

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Projeto Coordenado de Controladores em Sistemas de Potência,  
Incluindo Elos de Corrente Contínua.**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina  
para a obtenção do Grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

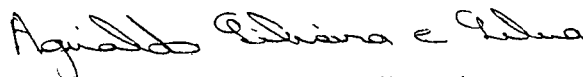
**THAIR IBRAHIM ABDEL HAMID MUSTAFA**

**Florianópolis, Setembro de 1994.**

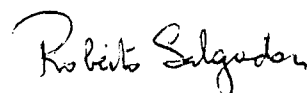
**Projeto Coordenado de Controladores em Sistemas de Potência,  
Incluindo Elos de Corrente Contínua.**

**Thair Ibrahim Abdel Hamid Mustafa**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
**Mestre em Engenharia**  
especialidade **Engenharia Elétrica**,  
e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação.

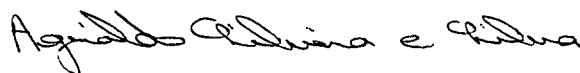


Prof. Aginaldo Silveira e Silva, Ph.D  
Orientador



Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

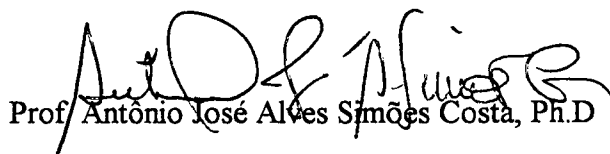
**Banca Examinadora:**



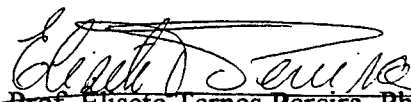
Prof. Aginaldo Silveira e Silva, Ph.D  
Presidente



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D



Prof. Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D



Prof. Elisete Ternes Pereira, Ph.D

*A Deus que esteve comigo em todos os momentos deste trabalho.*

*Aos meus pais Ibrahim e Muna Mustafa que sempre lutaram no sentido de dar a melhor formação moral a mim e a meus irmãos.*

*Aos meus irmãos Jarir, Fátima e Nádia que sempre me apoiaram, posso dizer que a distância nos aproximou ainda mais.*

*A mais justa de todas as causas, a Palestina.*

*Ao povo brasileiro que acolheu meus pais como filhos da terra.*

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, pelo apoio e competência na orientação deste trabalho.

Ao Prof. Hans Helmut Zürn, pelo apoio e orientação durante a fase de créditos.

Aos demais membros da Banca Examinadora, Prof. A.J.A. Simões Costa e Prof. Elisete Ternes Pereira, pelas discussões e sugestões apresentadas.

Sou grato também ao Prof. Roberto Salgado e aos demais professores do GSP, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, Daniel F. Coutinho (Negão), Fábio M. Coradini (Guina), Flávio T. do Prado (Paulista), Gerson Gabiatti (Pai de Família), Glaucio N. de Abreu (Nanico), José L. Kavamura (Kavaco) e Luiz H. Meyer (Zique), cuja convivência e amizade deram-me motivação na execução deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos da Pós-Graduação, Fernando Mussoi, Denise Souza, André Della Rocca Medeiros, Paulo André de Medeiros, Juan Gimenez, Márcia Vanti, Raimundo Teive, Fernando Busch, Flávio B. Lemos, os baianos Maurício Maia e Marcos Menezes, Gilmar Ribeiro, Luiz Otávio, Eliezer Júnior, Ruth Leão e aos demais que aqui não foram citados, mas que sempre permanecerão na memória.

Ao Doutorando Prof. Francisco Damasceno Freitas, cujas observações e discussões foram de grande valia para este trabalho.

Aos analistas do LABSPOT, José Eduardo Giacomelli (Zé Gotinha), Alexandre Perin (O Gorda), ao Eng. Alessandro Manzoni e ao Bolsista de IC Júlio César Maia, pela amizade e apoio prestados durante a elaboração da dissertação.

Ao secretário da PGEEL Wilson Costa, amigo e sempre prestativo.

Às secretárias do LABSPOT, Srta. Alessandra da Silva e Sra. Carmen Zettermann, pelo auxílio na prestação dos mais diferentes serviços.

Ao CNPq e ao contribuinte brasileiro pelo suporte financeiro.

## RESUMO

Este trabalho usa uma metodologia, baseada na técnica de posicionamento de pólos, para o projeto coordenado de controladores incluindo elos CC. O projeto considera as interações dinâmicas existentes entre as máquinas e visa melhorar o amortecimento dos modos eletromecânicos, alocando-os em uma posição mais adequada no plano complexo. O método utiliza a matriz jacobiana aumentada cuja alta esparsidade beneficia a aplicação do mesmo a sistemas de grande porte, permitindo desta forma a utilização de diversos modelos de componentes do sistema elétrico, entre os quais os elos de corrente contínua.

A avaliação do método foi realizada através do projeto coordenado de estabilizadores (ESP's) e controladores para modulação de potência ou corrente em elos CCAT em dois sistemas CA/CC. Os resultados mostram o efeito do controle do elo de CC no amortecimento de oscilações em sistemas de potência.

## ***ABSTRACT***

*This work uses a methodology based on pole placement for coordinated design of controllers, including DC links. This design considers the dynamical interactions that exist among the machines and intends to increase the damping of electromechanical modes through the allocation of them in a more adequate position in the complex plane. This method uses the augmented jacobian matrix, whose high sparsity allows its application in large power systems and the utilization of several models of electrical system components including DC links.*

*The method evaluation was done through the coordinated design of stabilizers (PSS's) and controllers for power or current modulation in HVDC links in two AC/DC systems. The results show the DC link control effects on the damping of oscillations in power systems.*

## SIMBOLOGIA

- $V_{CA}$  - Módulo da tensão CA.
- $V_{CC}$  - Módulo da tensão CC.
- $I_{CC}$  - Corrente CC.
- $I_{CA}$  - Corrente CA.
- $R_{CC}$  - Resistência da linha CC.
- $L$  - Indutância da linha CC.
- $L_A$  - Reator de alisamento.
- $R_c$  - Resistência de comutação.
- $X_c$  - Reatância de comutação.
- $\alpha$  - Ângulo de disparo do retificador.
- $\gamma$  - Ângulo de extinção do inversor.
- $\mu$  - Ângulo de comutação.
- $\xi$  - Amortecimento do autovalor.
- $\phi$  - Defasagem angular entre a tensão e a corrente no sistema CA.
- $a$  - Tap no secundário do transformador conversor.
- $P_{CA}$  - Potência ativa CA.
- $P_{CC}$  - Potência ativa CC.
- $Q_{CC}$  - Potência reativa CC.
- $I_{ord}$  - Corrente de ordem.
- $P_{ord}$  - Potência de ordem.
- $I_{mod}$  - Modulação de corrente.
- $P_{mod}$  - Modulação de potência.

## **Abreviações:**

- SEP - Sistema Elétrico de Potência.
- CCAT - Corrente Contínua em Alta Tensão.
- ESP - Estabilizador de Sistema de Potência.
- CER - Compensador Estático de Reativo.
- RAT - Regulador Automático de Tensão.
- CA/CC - Corrente Alternada / Corrente Contínua.
- CB - Controle de Bipólo.
- CP - Controle de Pólo.
- CPC - Controle da Ponte Conversora.
- CCr - Corrente Constante no retificador.
- CCi - Corrente Constante no inversor.
- CIA<sub>r</sub> - Ângulo de Ignição Constante no retificador.
- CEAi - Ângulo de Extinção Constante no inversor.
- CCA - Amplificador de Controle de Corrente.
- VCO - Oscilador Controlado por Tensão.
- CEC - Controle de Erro de Corrente.
- PI - Proporcional-Integral.

## **Operadores:**

- S : Operador diferencial ou operador de Laplace.
- $\partial$  : Derivada parcial.
- $\Delta$  : Variação incremental de uma grandeza.
- (V)<sup>t</sup> : Transposta da matriz ou vetor V.



# Índice

## Capítulo I - Introdução Geral

## Capítulo II - Estabilidade Dinâmica

II.1 - Introdução .....	5
II.2 - O Problema da Estabilidade Dinâmica em Sistemas de Potência .....	6
II.3 - Modelo Linearizado do Sistema de Potência e a Utilização da Matriz Aumentada .....	8
II.4 - Conclusão .....	11

## Capítulo III - Modelagem de Elos CCAT

III.1 - Introdução .....	12
III.2 - Estrutura Básica de um Elo CCAT .....	14
III.3 - Equações dos Conversores e da Linha CC .....	17
III.4 - Sistema de Controle do Elo CCAT .....	21
III.5 - Modulação de Potência e Corrente em Elos CCAT .....	32
III.6 - Análise da Estabilidade Dinâmica com a Inclusão de Elos CCAT .....	34
III.7 - Conclusão .....	37

## Capítulo IV - Projeto Coordenado de Controladores

IV.1 - Introdução .....	39
IV.2 - Formulação do Algoritmo .....	40
IV.3 - O Algoritmo para Posicionamento de Pólos .....	44
IV.4 - Conclusão .....	46

## Capítulo V - Resultados Numéricos

V.1 - Introdução .....	47
V.2 - Análise dos Resultados .....	48
V.3 - Descrição do Sistema 1 CA/CC .....	49
V.3.1 - Projeto de Controladores para o Sistema 1 CA/CC .....	50
V.4 - Descrição do Sistema 2 CA/CC .....	52
V.4.1 - Projeto de Controladores para o Sistema 2 CA/CC .....	53
V.5 - Simulação Não-Linear no Tempo .....	55
V.6 - Conclusão .....	56

## **Capítulo VI - Conclusão Geral**

<b>Bibliografia.....</b>	<b>61</b>
<b>Apêndice A .....</b>	<b>67</b>
<b>Apêndice B .....</b>	<b>75</b>

# Capítulo I

## Introdução Geral

A interligação de sistemas elétricos de potência tem como finalidade atender a energia elétrica demandada, com um elevado grau de confiabilidade, qualidade e economia.

Neste sentido, estudos de planejamento, operação e estabilidade de sistemas de potência tornam-se necessários, pois a modernização dos componentes do sistema elétrico, a grande utilização de controladores automáticos e a crescente interconexão de sistemas, afim de satisfazer as exigências anteriormente citadas, esbarram na diminuição das margens de estabilidade, com o surgimento de diferentes formas de instabilidade, observadas em função desta redução, como perda de sincronismo após uma perturbação, oscilações eletromecânicas pouco amortecidas, entre outras.

O surgimento de oscilações eletromecânicas pouco amortecidas ou mesmo com amortecimento negativo nas baixas frequências, causa vários problemas operacionais em um sistema elétrico interligado por linhas longas e em condições de carga alta, pois caso

estas oscilações atinjam uma certa magnitude, provocando desvios consideráveis da potência transmitida, a proteção poderá atuar de forma a retirar as linhas de operação. O amortecimento das oscilações eletromecânicas, através de sinais adicionais adequadamente projetados, possibilita o uso total da capacidade de transmissão do sistema, além de melhorar a qualidade da energia entregue aos consumidores.

São fontes de amortecimento adicional, os controladores nos sistemas de excitação das máquinas (ESP's), os controladores nos compensadores estáticos de reativos, a modulação de potência ativa ou corrente em sistemas de transmissão em corrente contínua (CCAT) e mais recentemente os dispositivos FACTS ("Flexible AC Transmission Systems").

Este trabalho, detém-se no estudo do comportamento dinâmico de sistemas de potência, na análise e projeto de controladores para melhorar o desempenho dinâmico do sistema, considerando-se a inclusão de Elos de Corrente Contínua.

A pesquisa e o desenvolvimento de equipamentos controláveis, que associados aos controladores já em operação no sistema, permitem uma grande flexibilidade no controle de sistemas de potência, entre os quais os FACTS, que tem como objetivo aumentar limites e flexibilizar a transmissão de potência em sistemas CA. Tanto a operação do ponto de vista de regime permanente, quanto os aspectos dinâmicos do controle são beneficiados pelo uso destes controladores. A utilização de elementos controlados requer, no entanto, que os mesmos sejam projetados e ajustados através de metodologias adequadas, afim de satisfazer os requisitos de operação do sistema, evitando que controles mal projetados deteriore a performance dinâmica do sistema.

Estudos recentes, mostram a preocupação e a pesquisa com problemas referentes à estabilidade dinâmica, entre os quais, o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores instalados nos sistemas de potência [3] [4] [5] [6] [7]. A utilização de diferentes técnicas e ferramentas matemáticas, para o projeto destes controladores, entre elas técnicas de posicionamento de pólos, permite que estruturas de controle sejam

analisadas e seus parâmetros ajustados dentro de um método de controle linear adequado, visando melhorar o amortecimento dos modos pouco amortecidos, através de uma alocação exata dos pólos no plano complexo.

Os algoritmos de ajuste coordenado dos controladores (ESP's), levando em conta as interações dinâmicas existentes entre as máquinas [6] e o semelhante projeto coordenado, que além de ESP's, considera os controladores dos compensadores estáticos de reativos [7], são originalmente baseados na técnica de posicionamento de pólos, através da compensação dinâmica da saída, proposta por Elangovan e Lin [8].

Outros métodos, abordando a teoria de controle ótimo, têm sido utilizados para o projeto de controladores, visando a estabilização de sistemas de potência [5]:

A pesquisa em técnicas de controle adaptativo [9] e [10], mostram-se promissoras, uma vez que a operação ótima dos controladores citados anteriormente, não é garantida para novas condições de carga, pois os controladores de parâmetros fixos são usualmente projetados para um determinado ponto de operação.

O aproveitamento de técnicas de sistemas lineares, no estudo da estabilidade de sistema de potência, permite a identificação dos modos de oscilação instáveis ou pouco amortecidos, a determinação dos elementos dinâmicos que mais contribuem para cada modo de oscilação, a identificação do melhor local para a introduzir o controlador, além de determinar os parâmetros dos vários controladores, utilizando-se técnicas de controle linear [2], [3].

O objetivo do estudo aqui desenvolvido, foi a implementação de um algoritmo, visando o projeto coordenado de controladores suplementares em sistemas de excitação de máquinas (ESP's), compensadores estáticos de reativos e elos de corrente contínua.

Para o projeto de controladores em elos CCAT, surgiu a necessidade da implementação da modelagem de elos de corrente contínua, bem como da implementação

de um fluxo de carga CA/CC (Apêndice B) para a definição de um ponto de operação do sistema CA/CC.

Todos os controladores destes dispositivos, podem ser adequadamente ajustados de forma a contribuir de modo eficaz ao aumento do amortecimento de oscilações eletromecânicas. O método é baseado no posicionamento de pólos por realimentação das saídas [8]. No algoritmo emprega-se a matriz Jacobiana ou matriz aumentada, explorando-se sua alta esparsidade, para alocação dos pólos. A robustez do projeto coordenado diante de variações paramétricas e saída de operação dos controladores é avaliada.

Apresenta-se a seguir, a estrutura deste trabalho:

O Capítulo II apresenta a definição de estabilidade dinâmica, determinando um modelo linearizado que utiliza a matriz aumentada para a análise de estabilidade.

O Capítulo III apresenta a modelagem de elos CCAT, desde a representação da estrutura básica até o sistema de controle, para a determinação das equações que representam o elo de corrente contínua em estudos de estabilidade dinâmica, como também os conceitos de modulações de potência e de corrente.

O Capítulo IV apresenta o projeto coordenado de controladores através da formalização do algoritmo para o posicionamento de pólos, usando-se a matriz aumentada.

O Capítulo V apresenta aplicações do algoritmo e seus resultados em dois sistemas exemplo, apresentados na forma de análise linear e simulação não-linear no tempo.

O Capítulo VI apresenta as conclusões e recomendações para desenvolvimentos futuros.

No Apêndice A, são apresentados os dados dos sistemas exemplo utilizados.

No Apêndice B, são apresentados algumas considerações a respeito dos programas implementados e utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

# **Capítulo II**

## **Estabilidade Dinâmica**

### **II.1 - Introdução:**

A crescente evolução e modernização de equipamentos em sistemas elétricos de potência, no sentido de atender à demanda de energia elétrica , com um elevado padrão de confiabilidade e qualidade, reduziram as margens de estabilidade do sistema, tornando os sistemas de potência sensíveis a diferentes formas de instabilidade.

Na análise de estabilidade, temos dois conceitos distintos, a estabilidade transitória e a estabilidade dinâmica. A estabilidade transitória , analisa a capacidade do sistema voltar ao equilíbrio logo após uma grande perturbação. A falta de estabilidade transitória poderá levar as máquinas do sistema, a uma perda de sincronismo. Para a análise deste tipo de estabilidade, empregam-se modelos matemáticos não lineares para a modelagem dos componentes.

Na estabilidade dinâmica, é observado o comportamento ou a resposta do sistema, quando submetido a pequenas perturbações. A instabilidade dinâmica, considera o surgimento de oscilações eletromecânicas pouco amortecidas ou com amortecimento negativo, que limitam a capacidade de transmissão do sistema elétrico. Como estas oscilações ocorrem para pequenas variações de carga em relação a um ponto de operação, utilizam-se modelos lineares para a modelagem dos diferentes componentes do sistema e para sua análise emprega-se a teoria de sistemas lineares.

## **II.2 - O Problema da Estabilidade Dinâmica em Sistemas de Potência:**

Com a interligação de Sistemas de Potência, a forma mais comum de instabilidade entre geradores síncronos, era a perda de sincronismo logo após uma grande perturbação no sistema, geralmente por falta de torque de sincronização.

No início da década de 60, com objetivo de melhorar o torque de sincronização, utilizaram-se reguladores automáticos de tensão (RATs) atuando sobre o sistema de excitação dos geradores, afim de aumentar as margens de estabilidade transitória. Se, por um lado, estes reguladores propiciaram uma melhoria do torque de sincronização, por outro lado, a experiência de operação com estes sistemas de excitação mais rápidos e de alto ganho (controlados por tiristor), mostrou uma deterioração da estabilidade dinâmica do sistema, devido a redução do torque de amortecimento.

A falta de estabilidade dinâmica, resulta no surgimento de oscilações associadas às inércias dos geradores síncronos interconectados, conhecidas como oscilações eletromecânicas ou modos de oscilação eletromecânicos. Estes modos estão na faixa das baixas frequências, tipicamente entre 0.2 a 2.5 Hz. [1]



Uma maior ou menor estabilidade destes modos, que governam a resposta dos sistemas de potência, podem definir uma operação segura para os mesmos. Para fins de análise, os modos de oscilação podem ser classificados em três classes:

- *modo local*, oscilações originadas entre uma usina e um grande sistema, através de linhas de transmissão fracas e com características radiais, suas frequências vão de 0.8 a 2.0 Hz.

- *modo intra-planta*, oscilações entre usinas de uma determinada área do sistema, suas frequências vão tipicamente de 1.5 a 2.5 Hz.

- *modo inter-área*, oscilações entre grupos de usinas de uma área do sistema em relação a grupos de usinas de outras áreas, estes modos têm frequências entre 0.2 e 0.8 Hz.

A estabilização do modo local, pode ser obtida com técnicas convencionais de projeto de sinais estabilizadores, utilizando a modelagem máquina-barra infinita. Para a análise dos modos intra-planta e inter-área, é importante uma representação detalhada da dinâmica dos componentes do sistema, para que se possa determinar corretamente os modos de oscilação, identificar os elementos que mais contribuem para as oscilações e para a avaliação dos elementos mais indicados para a introdução de sinais adicionais estabilizadores.

Dentre os sinais estabilizadores, utilizados para melhorar o amortecimento dos modos de oscilações eletromecânicas entre geradores síncronos temos:

- O controle suplementar no próprio sistema de excitação da máquina, realimentação que se denomina de estabilizador de sistema de potência (ESP);
- O controle suplementar em compensadores estáticos de reativos (CER's), que beneficia também o controle da tensão, o aumento da capacidade de

transmissão de potência, a otimização do fluxo de reativo, bem como maiores margens de estabilidade transitória;

- E o controle suplementar em sistemas de transmissão em corrente contínua, com o objetivo de modular a potência ativa(corrente) transmitida.

A análise e o controle, relativos ao amortecimento de oscilações eletromecânicas em sistemas de potência de grande porte, que englobam a localização e ajuste destes sinais estabilizadores, devem ser realizados através de um modelo linearizado em torno de um ponto de operação do sistema CA/CC.

Uma abordagem linearizada do sistema elétrico de potência, muito utilizada em trabalhos relacionados com a estabilidade dinâmica, é o modelo de Heffron-Phillips. Outra abordagem conhecida, é a formulação do sistema linearizado através da matriz jacobiana ou matriz aumentada, que preserva a identidade das variáveis de estado e algébricas, permite a inclusão de outros componentes do sistema elétrico e pode ser utilizada para tratar com sistemas de grande porte, devido a sua alta esparsidade.

A representação do sistema de potência, com seus diferentes componentes e controladores, é realizada através dos diversos modelos propostos na literatura técnica. É importante salientar, a influência destes modelos nos estudos de estabilidade dinâmica.

### **II.3 - Modelo Linearizado do Sistema de Potência e a Utilização da Matriz Aumentada:**

As equações representativas dos diversos modelos de componentes do sistema de potência, tais como máquinas síncronas, reguladores de velocidade, compensadores estáticos de reativo, elos de corrente contínua e outros, formam um conjunto de equações diferenciais e algébricas não-lineares da forma :

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}} &= f(\underline{x}, \underline{z}) \\ \underline{0} &= g(\underline{x}, \underline{z})\end{aligned}\quad (\text{II.1})$$

onde  $\underline{x}$  : vetor de variáveis de estado;  
 $\underline{z}$  : vetor de variáveis algébricas;  
 $\underline{0}$  : vetor com todos elementos nulos.

O estudo da estabilidade dinâmica de um Sistema Elétrico de Potência é realizado, linearizando-se as equações que descrevem o sistema em torno de um ponto de operação  $(\underline{x}_0, \underline{z}_0)$ , fornecido pelo fluxo de potência. Obtemos assim, o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \Delta \dot{\underline{x}} \\ \underline{0} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{x} \\ \Delta \underline{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \cdot \Delta u \\ y &= [c_1 \ c_2] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{x} \\ \Delta \underline{z} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (\text{II.2})$$

onde  $\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$  : Matriz Aumentada;  
 $b_1, b_2$  : vetores coluna de entrada;  
 $c_1, c_2$  : vetores linha de saída;  
 $u$  : variável de entrada;  
 $y$  : variável de saída.

Como se observa, a linearização do conjunto de equações permite calcular a Matriz Aumentada do sistema, onde é preservada a identidade das variáveis de estado e algébricas, além de permitir conservar a identidade das barras diferentes das de geração. Como consequência, os diversos componentes do sistema de potência podem ser modelados

e incluídos naturalmente na matriz indicada, bem como a implementação de sinais adicionais para o uso dos controladores, facilitando o projeto de controladores.

Outra vantagem da Matriz Aumentada, é a sua alta esparsidade, permitindo a formulação de algoritmos eficientes que empregam técnicas de esparsidade, sendo aplicados para representação e estudo da estabilidade dinâmica de sistemas de grande porte.

Como neste trabalho, a maior ênfase é dada à inclusão do Elo de Corrente Contínua e seus controles suplementares (Modulação de Potência e Corrente), um maior detalhamento sobre a abordagem da Matriz Aumentada pode ser encontrada em [2] e [7].

A representação em termos de variáveis de estado, pode ser obtida pela eliminação das variáveis algébricas na matriz jacobiana, resultando em:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\underline{x}} &= A \cdot \Delta \underline{x} + B \cdot \Delta u \\ y &= C \cdot \Delta \underline{x} + D \cdot \Delta u\end{aligned}\quad (\text{II.3})$$

onde:

$$\begin{aligned}A &= J_1 - J_2 \cdot (J_4)^{-1} \cdot J_3 \\ B &= b_1 - J_2 \cdot (J_4)^{-1} \cdot b_2 \\ C &= c_1 - c_2 \cdot (J_4)^{-1} \cdot J_3 \\ D &= -c_2 \cdot (J_4)^{-1} \cdot b_2\end{aligned}$$

A matriz  $A$ , representa a matriz de estado do Sistema de Potência. O cálculo de todos os seus autovalores associados, fornece informações sobre a estabilidade do sistema em torno do ponto de operação. Devido a sua característica de não-esparsidade e sua elevada ordem, a abordagem em termos da matriz de estados, apresenta uma limitação quanto à dimensão do sistema analisado, visto a exigência de elevados espaços de memória e tempo de CPU. Esta limitação de estados a serem representados, implica na simplificação

de modelos ou a não representação da dinâmica de alguns elementos de um sistema de grande porte.

#### **II.4 - Conclusão:**

A análise da estabilidade dinâmica, por ser tratar de um estudo do comportamento ou resposta do sistema de potência, quando o mesmo é submetido a pequenas perturbações, emprega normalmente a teoria de sistemas lineares para a modelagem dos diferentes componentes. Desta forma, a linearização do conjunto de equações permite o cálculo da Matriz Aumentada, facilitando a inclusão de diversos componentes, entre os quais, os elos CCAT.

No próximo capítulo, será apresentada a modelagem de sistemas de transmissão em corrente contínua, considerações a respeito de modulações de potência e corrente e suas contribuições para a melhoria da estabilidade dinâmica.

# **Capítulo III**

## **Modelagem de Elos CCAT**

### **III.1 - Introdução:**

Atualmente o emprego de elos de corrente contínua em alta tensão (CCAT), apresenta-se como uma solução para a transmissão de grandes blocos de potência a grandes distâncias, bem como na interconexão de sistemas elétricos operando a diferentes frequências ou com diferentes filosofias de controle.

Esses elos, que envolvem a conversão de corrente alternada em corrente contínua, realizada pela estação retificadora e a conversão da corrente contínua novamente em corrente alternada realizada pela estação inversora, permitem interligar sistemas elétricos sem estabelecer entre eles qualquer vínculo de tensão, frequência ou sequência de fases.

As estações conversoras são formadas por pontes conversoras, às quais estão associados transformadores conversores, reatores, filtros e equipamentos de suporte

de reativos (banco de capacitores, máquinas síncronas e compensadores estáticos), além de sistemas de controle, proteção e supervisão das conversoras (Figura III.1).

As pontes conversoras são compostas de válvulas, formadas por vários tiristores conectados em série para suportar altas tensões, e em paralelo para altas correntes, agrupadas segundo um arranjo denominado **Ponte de Graetz** de 6 pulsos ou associação série de pontes de 6 pulsos (Figura III.2) [11].

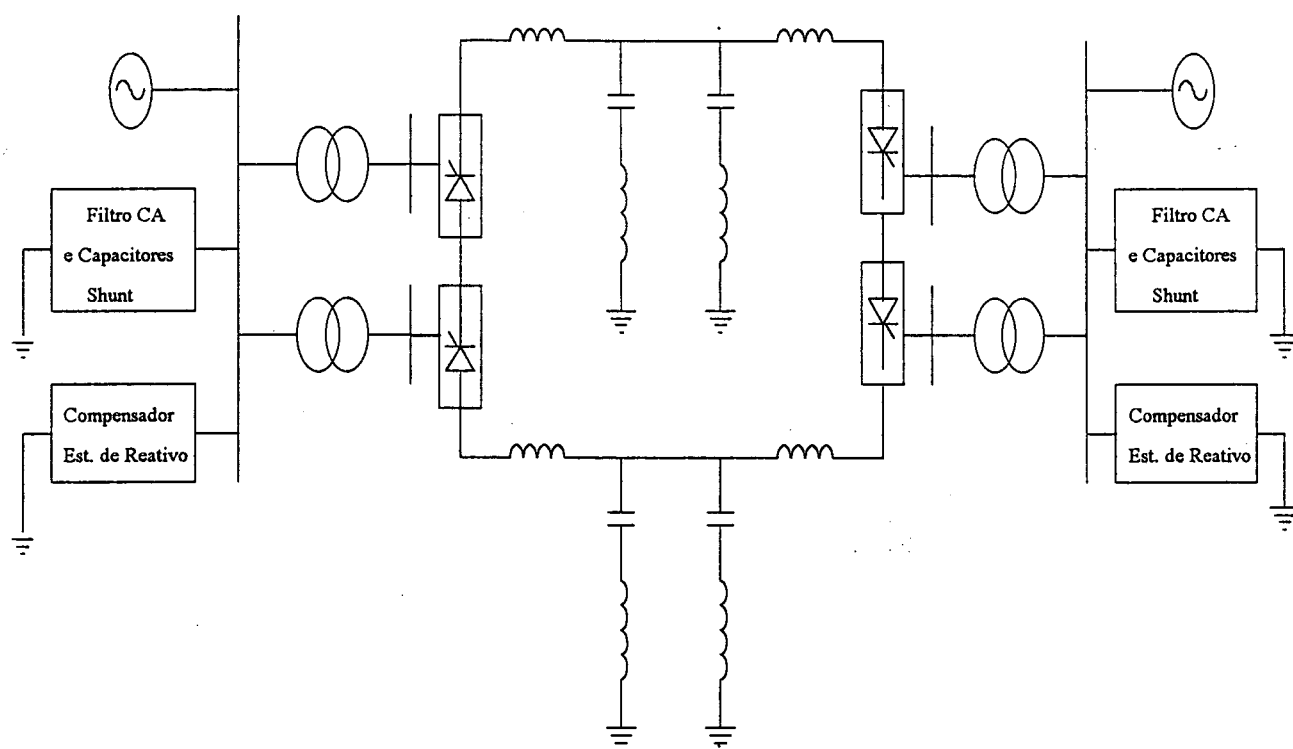


Fig. III.1 - Diagrama Esquemático dos Componentes de um Elo CCAT.

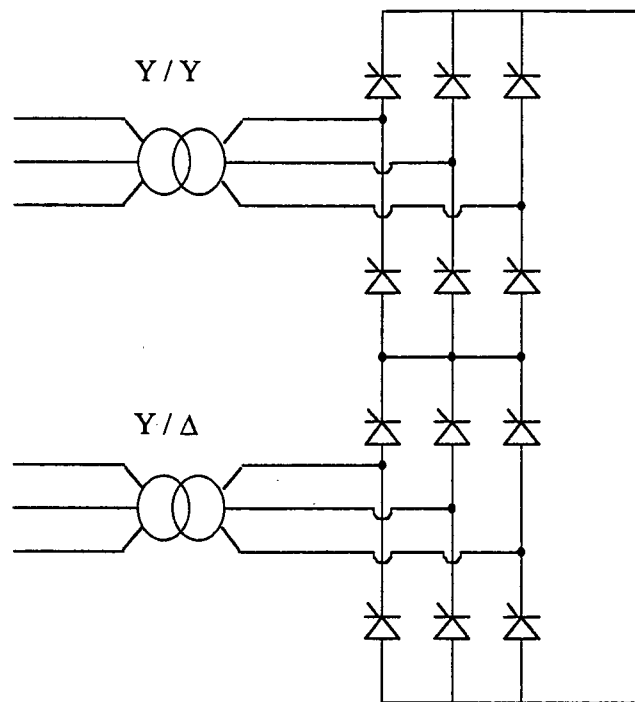


Fig. III.2 - Associação Série de duas Pontes de Graetz de 6 pulsos.

### III.2 - Estrutura Básica de um Elo CCAT:

Os sistemas de corrente contínua podem ser classificados em três modalidades:

- Elo Monopolar ( Um condutor e retorno pela terra ) ;
- Elo Bipolar ( Dois condutores, um positivo e outro negativo ) ;
- Elo Homopolar ( Dois ou mais condutores de mesma polaridade ) .





A válvula conversora é uma ponte trifásica de onda completa de 12 pulsos, formada por uma associação em série de duas pontes de 6 pulsos.

As indutâncias presentes no sistema evitam a comutação instantânea na condução de corrente de uma válvula para outra, ou seja, de uma fase para outra. O intervalo de tempo durante o qual uma válvula comuta para a outra, com ambas válvulas conduzindo ao mesmo tempo (tempo de superposição) é medido através de um ângulo de comutação ( $\mu$ ). Este ângulo, associado aos ângulos de disparo do retificador ( $\alpha$ ) e de extinção do inversor ( $\gamma$ ), implica na absorção de reativos por parte das conversoras.

O reator de alisamento ("smoothing reactor") com uma determinada indutância, tem a função de reduzir as ondulações ("ripple") na corrente da linha CC, assim como na tensão CC após o reator. O valor médio da tensão CC é o mesmo antes e depois do reator.

Os conversores do elo CCAT podem ser constituídos por uma única ponte de 6 pulsos, uma ponte de 12 pulsos, ou uma associação série de pontes de 12 pulsos, possibilitando níveis mais elevados de tensão na linha CC. Supondo a existência de uma uniformidade de componentes e de controle, um único conversor equivalente pode ser utilizado em estudos de estabilidade.

Para a transmissão CCAT na modalidade de um elo bipolar, em estudos de estabilidade, pode-se também utilizar um monopolo equivalente em lugar da estrutura bipolar, considerando-se a simetria dos dois pólos componentes. Esta equivalência é uma extensão do conversor equivalente, como é ilustrada na Figura III.4.

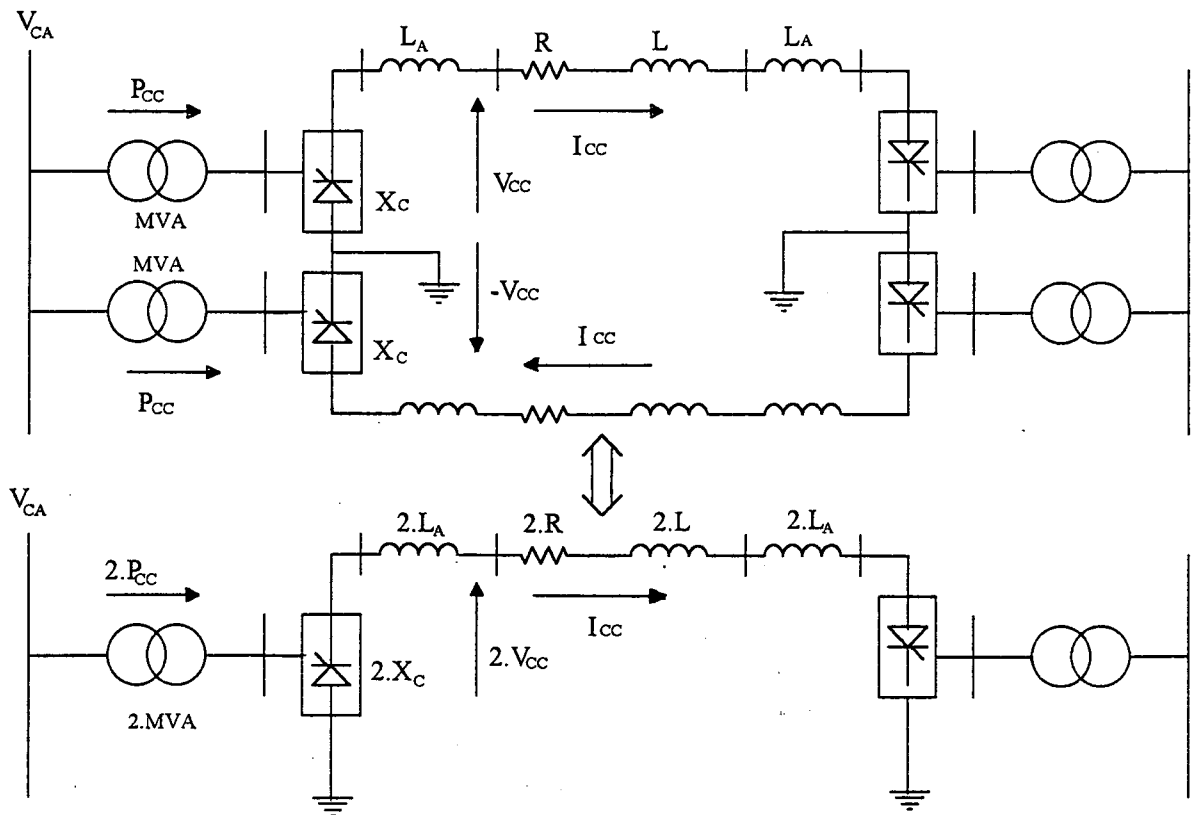


Fig. III.4 - Monopolo Equivalente.

### III.3 - Equações dos Conversores e da Linha CC:

O desenvolvimento das equações que representam os conversores e a linha CC não se adaptaria aos objetivos do trabalho, já que encontra-se bem documentado em diversos trabalhos acadêmicos e literatura técnica sobre transmissão em CCAT. Optou-se portanto, pela apresentação das equações básicas correspondentes ao elo CC.

Os circuitos equivalentes para as conversoras retificadora e inversora são mostrados nas figuras III.5 e III.6, respectivamente.

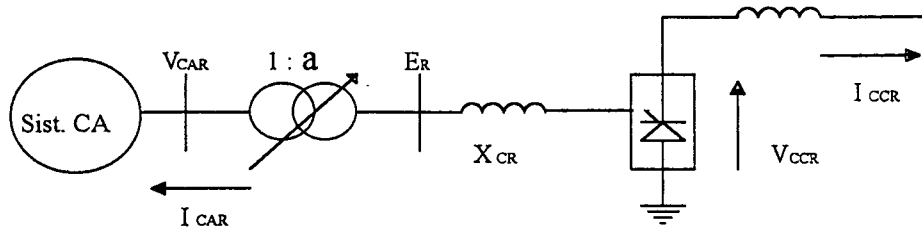


Fig. III.5 - Conversor Retificador.

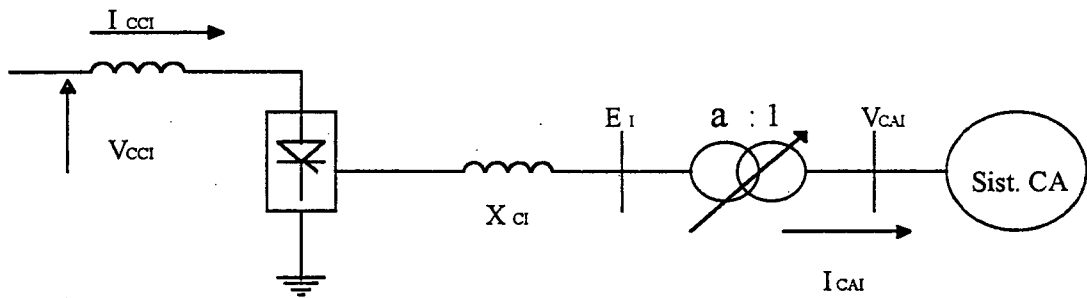


Fig. III.6 - Conversor Inversor.

A tensão CC média no conversor retificador, em função do ângulo de disparo  $\alpha$ , é dada por [11], [13], [15]:

$$V_{CC_R} = k.a.V_{CA_R}.\cos\alpha - R_{C_R}.I_{CC_R} \quad (\text{pu}) \quad (\text{III.1})$$

e no conversor inversor, em função do ângulo de extinção  $\gamma$ , por :

$$V_{CC_I} = k.a.V_{CA_I}.\cos\gamma - R_{C_I}.I_{CC_I} \quad (\text{pu}) \quad (\text{III.2})$$

onde:  $k = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}$

$\alpha$  : Tap no secundário do transf. conversor.

$V_{CC}$  : Módulo da tensão CC (pu).

$V_{CA}$  : Módulo da tensão CA (pu).

$I_{CC}$  : Corrente na linha CC (pu).

$R_c$  : Resistência de comutação.

Na teoria de conversores demonstra-se que as resistências de comutação são funções das reatâncias dos transformadores conversores e da reatância equivalente do sistema CA até a barra conversora. Chamando-se esta reatância total de Reatância de Comutação  $X_c$  [36]:

$$R_c = \frac{3 \cdot X_c}{\pi} \quad (\text{pu}) \quad (\text{III.3})$$

Sendo  $\phi$  a defasagem angular entre a tensão e corrente no sistema CA, no primário dos transformadores conversores, as seguintes relações aproximadas entre grandezas CA e CC para o cálculo do fator de potência são obtidas [11], [15] :

$$\cos \phi_R \cong \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)}{2} \quad (\text{III.4})$$

$$\cos \phi_I \cong \frac{\cos \gamma + \cos(\gamma + \mu)}{2} \quad (\text{III.5})$$

Com as relações (III.4) e (III.5), as tensões médias CC nos conversores podem também ser escritas como :

$$V_{CC_R} = k.a. V_{CA_R} \cdot \cos\phi_R \quad (\text{III.6})$$

$$V_{CC_I} = k.a. V_{CA_I} \cdot \cos\phi_I \quad (\text{III.7})$$

Desprezando as perdas no transformador conversor e considerando tensões balanceadas, tem-se as seguintes relações de potência entre o sistema CA e CC:

$$P_{CC} = P_{CA} \quad (\text{III.8})$$

$$P_{CC} = V_{CC} \cdot I_{CC} = \sqrt{3} \cdot V_{CA} \cdot I_{CA} \cdot \cos\phi \quad (\text{III.9})$$

$$Q_{CC} = P_{CC} \cdot \text{tg}\phi \quad (\text{III.10})$$

Considerando as relações (III.8), (III.9) e (III.10), tem-se que a potência ativa  $P_{cc}$  consumida pelo retificador e a fornecida pelo inversor são expressas por:

$$P_{CC_R} = V_{CC_R} \cdot I_{CC_R} \quad (\text{III.11})$$

$$P_{CC_I} = V_{CC_I} \cdot I_{CC_I} \quad (\text{III.12})$$

e a potência reativa  $Q_{cc}$  consumida pelos conversores é dada, por :

$$Q_{CC_R} = V_{CC_R} \cdot I_{CC_R} \cdot \text{tg}\phi_R \quad (\text{III.13})$$

$$Q_{CC_I} = V_{CC_I} \cdot I_{CC_I} \cdot \text{tg}\phi_I \quad (\text{III.14})$$

Em regime permanente, o elo CC deve ainda satisfazer à equação:

$$I_{CC} = \frac{V_{CC_R} - V_{CC_I}}{R_{CC}} \quad (\text{III.15})$$

$R_{cc}$  : Resistência da linha CC.

Na análise da estabilidade dinâmica, a linha CC pode ser modelada por um circuito R-L série, onde R é a resistência da linha , e L é a indutância total da linha acrescida da indutância dos reatores de alisamento [16] .

A equação diferencial que descreve a corrente na linha CC, em função das tensões CC dos conversores é [15] :

$$\frac{d}{dt} I_{CC_R} = \frac{V_{CC_R} - V_{CC_I}}{L} - \frac{R_{CC}}{L} \cdot I_{CC_R} \quad (\text{III.16})$$

e a relação entre a corrente no retificador e no inversor é:

$$I_{CC_R} = I_{CC_I} \quad (\text{III.17})$$

As equações básicas apresentadas, podem ser utilizadas na medida em que os estudos de fluxo de potência e estabilidade não levem em conta os desequilíbrios da tensão CA .

#### III.4 - Sistema de Controle do Elo CCAT :

Como em um sistema de transmissão CCAT, a corrente na linha CC depende basicamente da diferença de tensão entre os terminais do retificador e do inversor pela resistência da linha.

As equações mostram de modo prático, que as tensões CC dependem das tensões CA nas barras terminais, reatância dos transformadores (reatância de comutação), posição dos "taps" dos transformadores conversores e dos ângulos de disparo ( $\alpha$ ) e extinção ( $\gamma$ ) das válvulas conversoras.

Como as tensões CA variam em decorrência de qualquer distúrbio no sistema e as reatâncias de comutação permanecem praticamente fixas, o fluxo de corrente (ou potência) no elo CCAT pode ser controlado através dos ajustes de "taps" e os ângulos de disparo e de extinção das conversoras. Esses elementos de controle permitem, dentro dos limites de atuação dos comutadores de "tap" e dos ângulos, aliar as vantagens da operação do elo CCAT em corrente constante e tensão constante.

Em estudos de estabilidade dinâmica, os comutadores de "tap" são considerados fixos, devido à sua lenta atuação (em torno de 3 e 6 segundos) enquanto que o controle da corrente (ou potência) no elo é exercido pelo controle de disparo, que comanda a ignição e a extinção das válvulas.

A corrente na linha CC é mantida constante através de "reguladores de corrente", que atuam coordenadamente sobre os ângulos de ignição das válvulas conversoras, no sentido de eliminar o erro de corrente calculado como a diferença entre uma corrente (ou potência) de referência,  $I_{ord}$ , e a corrente na linha,  $I_{cc}$ .

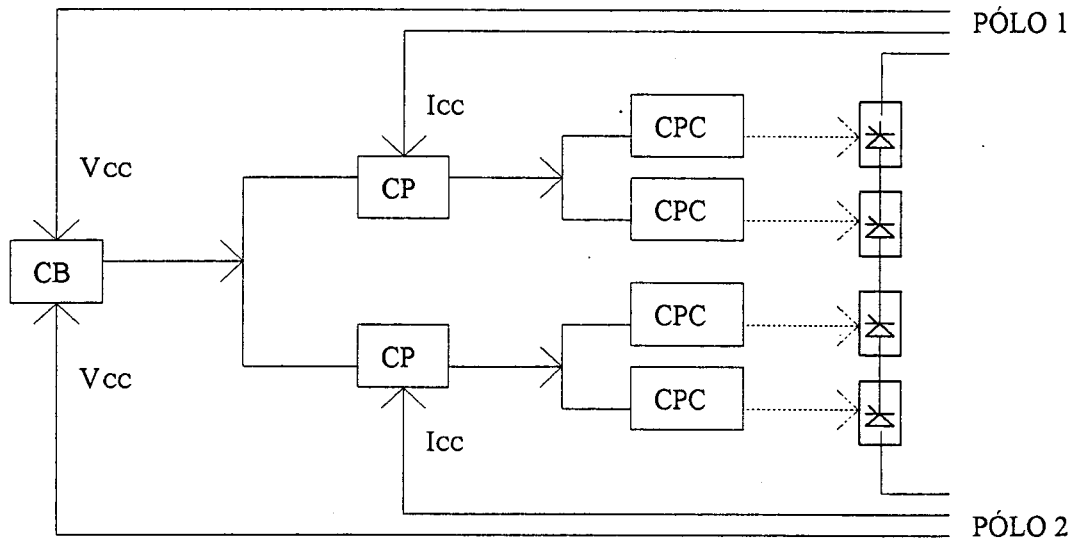
A possibilidade de controlar rapidamente a corrente transmitida pelo elo CC permite a utilização de modulações de corrente (ou potência), para que o sistema CCAT contribua de forma a melhorar a estabilidade dinâmica do sistema CA [15].

O controle da operação de uma ligação CCAT, apresenta uma estrutura de coordenação hierárquica, devido à complexidade e à diversidade de malhas de controle. No nível superior têm-se o bipolo, a seguir o pólo e, em nível inferior, as pontes conversoras.

Ao nível do *Controle de Bipolo*, se reservam as funções de determinação e supervisão de potência transmitida no elo, enquanto que ao nível de *Controle de pólo* encontramos a implementação do controle de corrente, verificando se houve a violação de algum limite restritivo ( $I_{cc}-I_{ord}$ ) e gerando pulsos de tensão nos instantes adequados de disparo para obtenção da corrente desejada. Os sinais de tensão são enviados ao nível do *Controle das Pontes Conversoras*, responsáveis pelo controle de disparo das válvulas.

A figura III.7, mostra um diagrama da estrutura hierárquica de controle.





onde : CB - Controle de Bipólo      CP - Controle de Pólo  
 CPC - Controle das Pontes Conversoras

Fig. III.7- Estrutura Hierárquica de Controle.

Nos elos de corrente contínua, tem-se como filosofia de controle típica o controle de corrente na estação retificadora, enquanto não se atingirem os limites de ângulo de disparo mínimo ou máximo ( $\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_{\max}$ ). Com o ponto de operação normal  $\alpha=15^\circ$ , próximo do limite  $\alpha_{\min}=5^\circ$ , durante uma queda de tensão no lado de corrente alternada, o retificador altera o valor de  $\alpha$  até o valor mínimo. Se isto não for suficiente para contornar o problema, a estação inversora passa a controlar a corrente através de variações (elevação), do ângulo de extinção  $\gamma$ , mantendo o ângulo de disparo no seu valor constante  $\alpha_{\min}$ .

A fig. III.8, mostra a Característica Estática  $V_{cc}-I_{cc}$  de um elo com Controle de Corrente Constante na retificadora e na inversora (CCr e CCi), Ângulo de Ignição Constante na retificadora (CIAr) e Ângulo de Extinção Constante na inversora (CEAi).

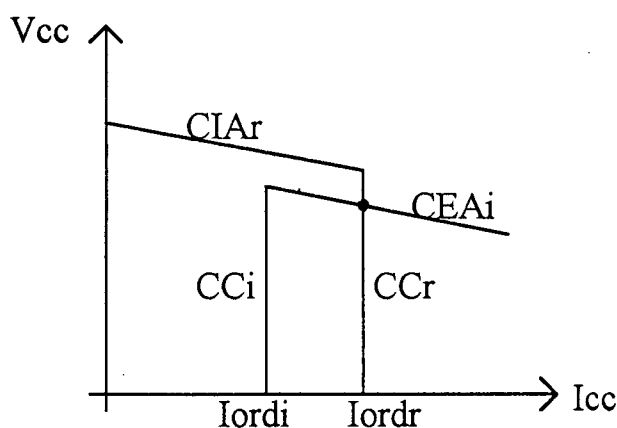


Fig. III.8 - Característica Estática Básica

As interseções das características CCr e CEAi ou CIAr e CCi definem os pontos de operação estáveis do elo. Nos elos em operação, além da ação destas características básicas de controle, existem outras, introduzidas com a finalidade de melhorar a estabilidade dinâmica do elo, diante de perturbações no sistema CA/CC. A implementação de outros modos de operação, modificam a característica estática  $V_{cc} - I_{cc}$ , como mostra a figura III.9.

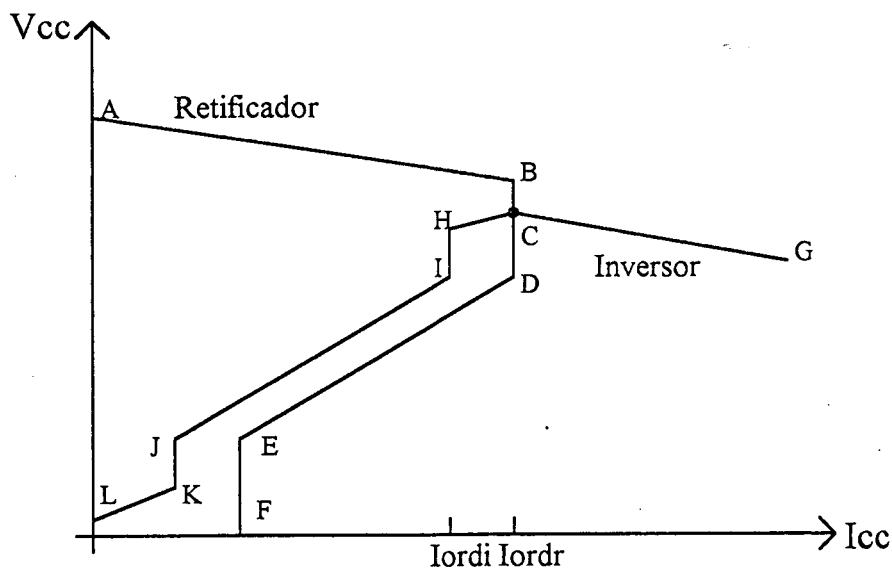


Fig. III.9 - Característica Estática Completa.

Na fig. III.9, o ponto de operação caracteriza-se pelo controle de corrente no retificador e o controle do ângulo de extinção no inversor.

Nos estudos de estabilidade a pequenas perturbações, em que o elo CCAT esteja operando em torno do seu ponto de operação normal, os controles a nível de pólo podem ser suficientemente representados pela função de transferência do CCA ("Current Control Amplifier") e do VCO ("Voltage Controlled Oscillator") do retificador, e do controle de  $\gamma$  constante do inversor. Como após a eliminação de grandes perturbações no sistema CA, o elo CCAT geralmente volta a operar em torno do seu ponto de operação normal, esta representação também é adequada para o projeto de sinais estabilizadores para amortecer oscilações eletromecânicas críticas no sistema CA, através de modulação de potência ativa (corrente) no elo CCAT [15].

O Amplificador de Controle da Corrente, CCA, funciona como um regulador de corrente, onde o sinal de entrada é obtido pela diferença existente entre a ordem de corrente na retificadora,  $I_{ord}$ , e a corrente medida na linha CC,  $I_{cc}$ , gerando uma

tensão  $V_c$  proporcional ao erro ( $I_{ord}-I_{cc}$ ), que é enviada aos controles das pontes conversoras, onde o ângulo de disparo das válvulas é modificado afim de eliminar o erro da corrente.

A função de transferência do CCA deve possuir as características dinâmicas necessárias para um bom desempenho do sistema de controle, sendo adotado atualmente funções de transferência do tipo PI (Proporcional- Integral) [15] .

O Oscilador Controlado por Tensão, VCO, é um circuito gerador de pulsos, com uma frequência de repetição que é controlada pela tensão de entrada  $V_c$ . Um trem de pulsos é enviado às válvulas conversoras de modo a manter o ângulo de disparo  $\alpha$  requerido.

O Controle de Corrente é apresentado na fig. III.10, representando o amplificador CCA e o oscilador VCO para o controle de ponte conversora, em estudos de estabilidade a pequenas perturbações.

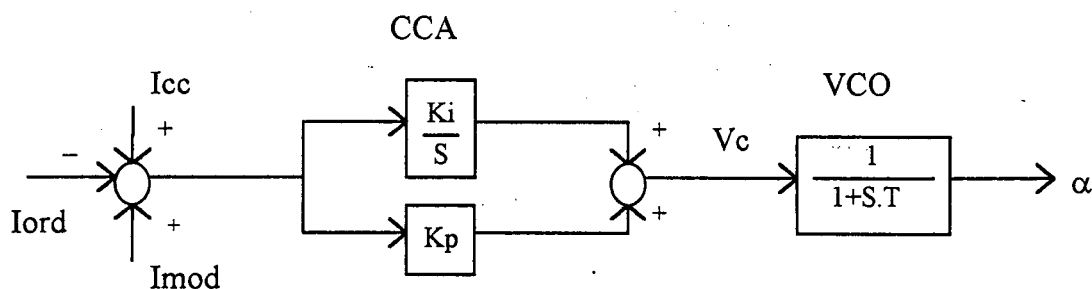


Fig. III.10 - Diagrama de Blocos do Controle de Corrente.

A referência de corrente, anteriormente considerada fixa, pode ser determinada em função de outra grandeza mais utilizada para o controle de operação do sistema elétrico, como a potência ativa transmitida pelo elo CCAT ou a potência reativa

consumida pelas conversoras. O Controle de Potência Constante, que se superpõe ao controle de corrente, é realizado ao nível do controle de bipolo através do cálculo da referência de corrente, em função da ordem de potência,  $P_{ord}$ , ditada pelo centro de operações do sistema e da tensão,  $V_{cc}$ , medida numa das extremidades do elo.

Assim, a ordem de corrente não é mais um valor constante quando o elo CCAT estiver operando sob controle de potência, mas irá variar em função de oscilações na tensão  $V_{cc}$  ou de modificações na ordem de potência, decorrentes da ação de modulação realizada através de uma malha de controle suplementar.

O emprego de controle de corrente na operação do elo CCAT, só é mais interessante para a performance dinâmica do sistema global, durante um período transitório, quando da eliminação de uma grande perturbação no sistema CA, visto que o controle de potência requer um elevado suprimento de reativo. No mais, é natural que sob o ponto de vista operativo, exista um interesse maior em ditar a potência a ser transmitida pelo elo, dado que de forma tradicional a operação do sistema elétrico é baseada no controle da potência ativa gerada e na potência ativa que flui nas linhas que interligam diferentes áreas desse sistema.

Utilizando-se um bloco atrasador na medição da tensão CC, obtém-se transitóriamente uma característica de controle de corrente constante dentro do modo de controle de potência constante. O valor da constante de tempo de retardo é ajustado através de estudos de desempenho dinâmico, sendo que no caso do sistema CCAT de Itaipu utilizou-se o valor de 500 ms [15].

O diagrama de blocos que representa o elo CCAT em controle de potência e a característica transitória de controle de corrente em estudos de estabilidade dinâmica é mostrado na fig. III.11.

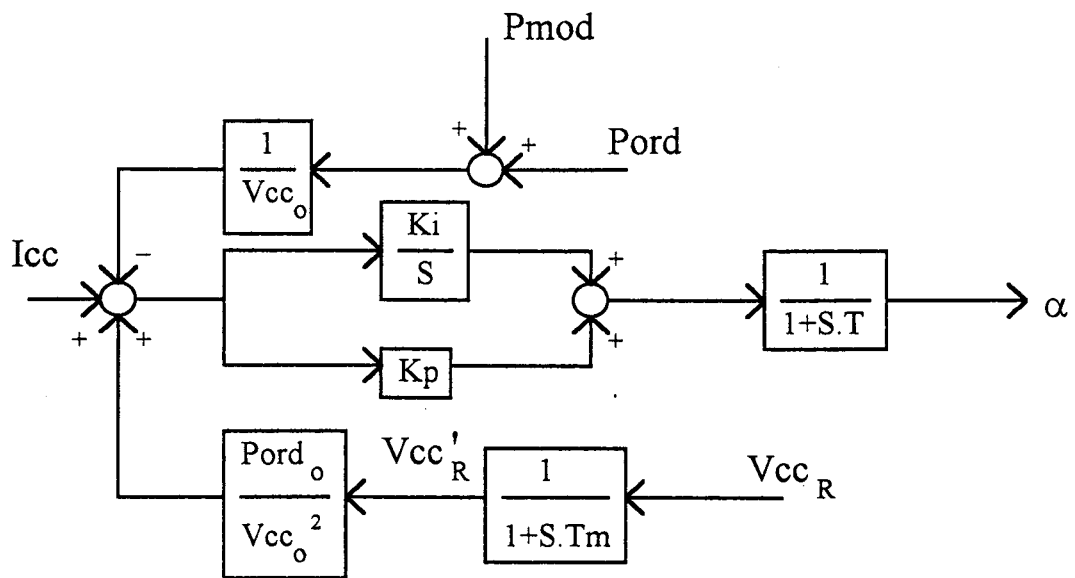


Fig. III.11 - Controle de Potência no elo CCAT.

No intervalo definido pela margem de corrente, trecho HC da característica estática completa, fig.III.9, observamos uma modificação interessante da característica básica da inversora, que é introduzida pelo Controle de Erro de Corrente, CEC ("Current Error Control"). Quando a resistência equivalente de comutação da inversora exceder a resistência da linha CC, as características das conversoras podem apresentar mais de um ponto de cruzamento, provocando a instabilidade de controle da ligação CCAT, conhecida por **Instabilidade de Três Pontos** ("three point cross-over instability"), fig. III.12 [16] .

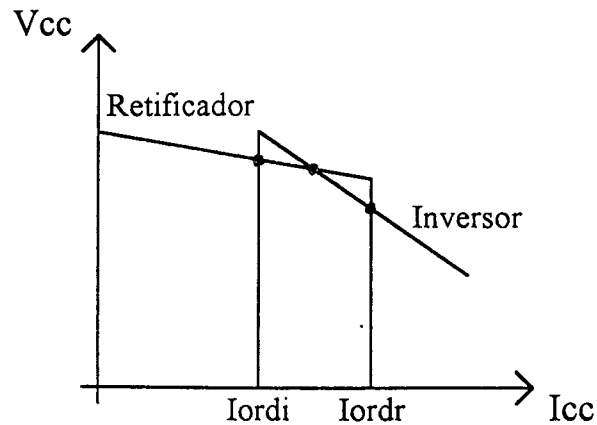


Fig. III.12 - Instabilidade de Três Pontos.

A atuação do CEC, visa simplesmente acrescentar à referência do ângulo de extinção mínimo, um sinal proporcional a diferença entre a corrente de ordem ,  $I_{ord}$ , e a corrente medida na linha ,  $I_{cc}$ , como se observa na fig. III.13.

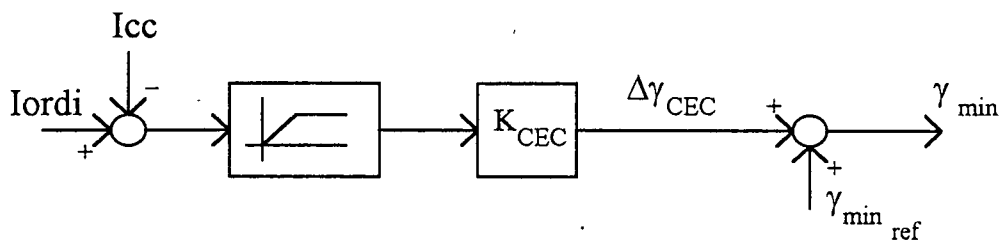


Fig. III.13 - Modelo do CEC para estudo de estabilidade convencional.

Com a limitação do sinal de erro entre  $I_{ord}$  e  $I_{cc}$  somente a valores positivos, impede-se a atuação do CEC no sentido de reduzir o ângulo de extinção mínimo, pois o valor de  $\Delta\gamma$  será sempre positivo.

Em períodos transitórios, em que ocorrem decréscimos na corrente da linha CC ou elevação da corrente de ordem do inversor ( $I_{ordi}$ ), o CEC atua mesmo que tenha sido implementado para a solução de um problema de regime permanente, como na instabilidade de controle, provocada pelos múltiplos cruzamentos entre características

estáticas, fig. III.12. Devido à descontinuidade apresentada pelo CEC no ponto de operação normal do elo CCAT, permitindo apenas excursões positivas de  $\Delta\gamma$ , este modo de controle não pode ser representado na malha de controle do inversor para estudos de pequenas perturbações [15].

O controle de  $\gamma$  constante no inversor pode ser representado de forma aproximada, considerando-se  $\Delta\gamma=0$  ou de forma mais detalhada, levando em consideração a influência das variações de tensão CA e da corrente da linha CC, conforme é mostrado no diagrama de blocos da fig. III.14 [15].

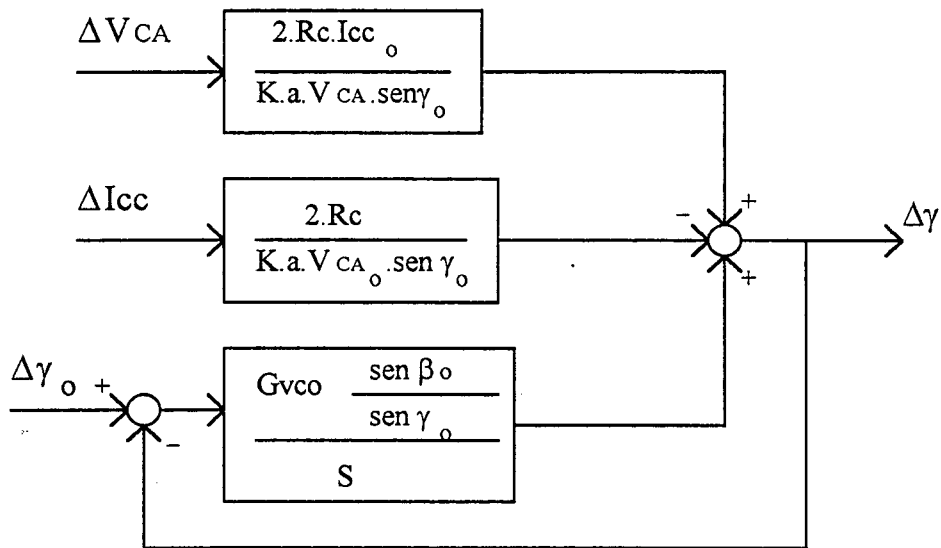


Fig. III.14 - Controle de  $\gamma$  do Inversor.

$$\text{onde: } \beta_0 = \cos^{-1} \left[ \cos \gamma_0 - \frac{2.R_C.I_{CC_0}}{k.a.V_{CA_0}} \right]$$

$G_{VCO}$  = Ganho do VCO, geralmente na faixa de 50 a 400 (rad/seg)/rad .



Com o modelo de controle definido, obtemos condições de implementar as equações dos modos de controle na retificadora e inversora. Em nosso trabalho, utilizamos o controle de corrente ou controle de potência no retificador, fig. III.15 e fig. III.16 e a forma aproximada do controle de  $\gamma$  no inversor,  $\Delta\gamma=0$ .

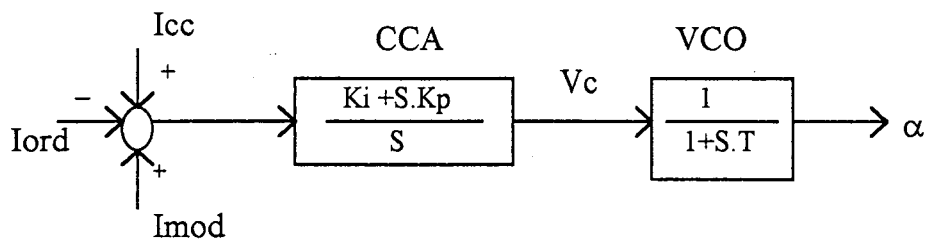


Fig.III.15 - Controle de Corrente no retificador.

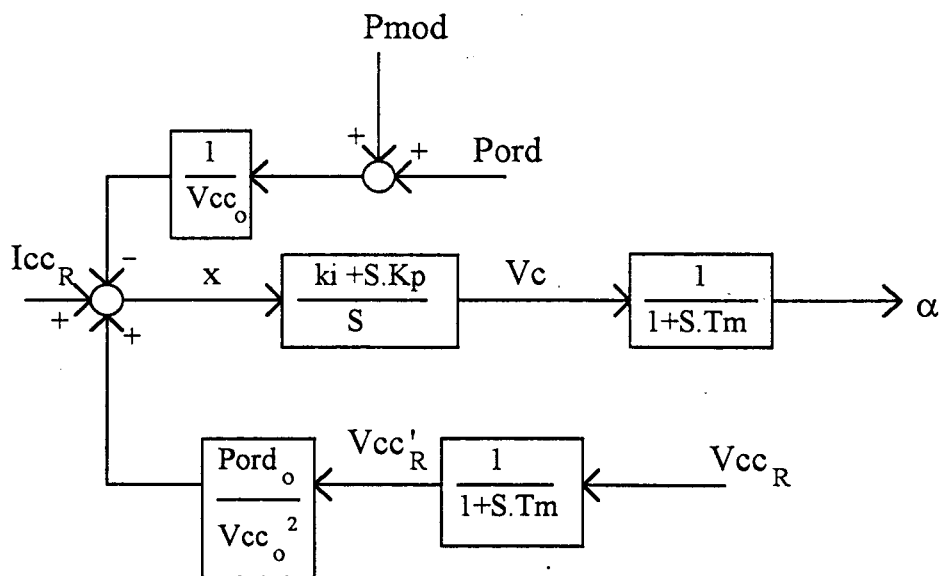


Fig. III.16 - Controle de Potência no retificador.

Com a utilização da variável auxiliar  $x = V_c - K_p \cdot (I_{cc} - I_{ord} + I_{mod})$ , com  $I_{mod}$  caso haja modulação de corrente, obtemos as seguintes equações de estado para o controle de potência:

$$\frac{d}{dt} x = k_I \cdot (I_{CC_R} - I_{ord} + I_{mod}) \quad (III.18)$$

$$\text{onde: } I_{ord} = \left( \frac{P_{ord} + P_{mod}}{V_{CC_0}} \right) - \frac{P_{ord}}{V_{CC_0}^2} \cdot V'_{CC_R} \quad (III.19)$$

$$\frac{d}{dt} \alpha = \frac{x}{T} - \frac{\alpha}{T} + \frac{k_P}{T} \cdot (I_{CC_R} - I_{ord} + I_{mod}) \quad (III.20)$$

$$\frac{d}{dt} V'_{CC_R} = \frac{V_{CC_R}}{T_m} - \frac{V'_{CC_R}}{T_m} \quad (III.21)$$

Na Seção III.6, as equações algébricas e de estado do elo CCAT, serão devidamente linearizadas em torno do ponto de operação, para que possam ser expressas matricialmente, e introduzidas na matriz jacobiana do sistema CA/CC, de modo a representar o elo CCAT nos estudos de estabilidade dinâmica.

### III.5 - Modulação de Potência e Corrente em Elos CCAT:

Uma moderna tendência de aumentar os limites de potência em sistemas de transmissão CA e a interligação de sistemas elétricos remotos ou isolados, pode ser associada com a redução, no sistema, dos torques de sincronização e amortecimento, bem como problemas de estabilidade de tensão, controle de frequência e restabelecimento confiável após faltas, entre outros.

A possibilidade de controlar rapidamente a corrente no elo CCAT, permite que modulações de potência ou corrente nos conversores, contribuam com a melhoria da estabilidade dinâmica do sistema CA, sendo tema de diversos trabalhos [15],[20],[21],[23],[24],[25],[26],[27],[28],[29],[30] e [31].

Sinais de modulação de Potência Ativa, **Pmod**, são usualmente introduzidos através do *Controle de Bipólo*, o qual cabe as funções de determinação e supervisão da potência transmitida no elo CCAT. Um sinal **Pmod**, pode ser usado tanto para aumentar ou reduzir a ordem de potência CC, **Pord**, com a finalidade de fornecer amortecimento às oscilações eletromecânicas do sistema CA, quando o elo estiver operando sob o modo de potência constante, fig. III.11.

Outro sinal modulador também pode ser introduzido com a mesma finalidade do anterior, só que a nível do *Controle de Pólo*, onde se implementa o controle de corrente, temos assim a modulação de Corrente no retificador do elo CCAT, **Imod** fig. III.10.

Os controladores utilizados para a Modulação de Potência ou Corrente CC, são muito simples. Consistem de um ganho  $K$  e um filtro *Wash-Out* ou a combinação destes com funções de avanço-atraso (*Lead-Lag*), fornecendo um deslocamento de fase próprio para os controladores.

Neste trabalho, para modular a ordem de potência no elo, utilizamos sinais derivados do módulo de tensão  $|V|$ , da diferença de frequência entre as barras CA da retificadora e inversora  $\Delta f_{R,I}$  e a velocidade do gerador síncrono  $\omega$ . Para a modulação de corrente, só não foi utilizado o sinal derivado da velocidade.

A fig. III.17, mostra a estrutura geral de um controlador para modulação de potência ou corrente.

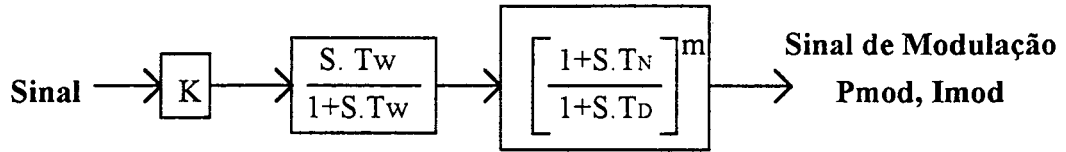


Fig.III.17 - Estrutura do Controlador para Modulação.

Em qualquer caso, ambas as modulações mostram-se como metodologias muito eficazes para o amortecimento de oscilações eletromecânicas críticas em sistemas de potência, sendo aplicados a modos de operação em potência e corrente constantes, na conversora retificadora. No Capítulo V, são ilustradas situações onde os sinais de modulação no sistema de potência CCAT, são utilizados para prover os sistemas de potência com torque de amortecimento, melhorando a estabilidade dinâmica.

### III.6 - Análise da Estabilidade Dinâmica com a Inclusão de Elos CCAT:

Em estudos de Estabilidade Dinâmica, adotando-se a formulação do sistema linearizado através da Matriz Jacobiana ou Matriz Aumentada (Seção III.3), que permite a inclusão de outros componentes do sistema elétrico, linearizaremos as equações algébricas e de estado do elo CCAT, apresentadas na modelagem do mesmo.

Desta forma, as equações podem ser expressas matricialmente e introduzidas na matriz jacobiana do sistema CA/CC.

Linearizando as equações da Seção II.3, em torno do ponto de operação  $(\underline{x}_o, \underline{z}_o)$ , obtemos as seguintes expressões:

$$\Delta V_{CC_R} = k.a.\cos\alpha_o.\Delta V_{CA_R} - k.a.V_{CA_R}^o.\text{sen}\alpha_o.\Delta\alpha - R_{C_R}.\Delta I_{CC_R} \quad (\text{III.22})$$

$$\Delta V_{CC_I} = k.a.\cos\gamma_o.\Delta V_{CA_I} - k.a.V_{CA_I}^o.\text{sen}\gamma_o.\Delta\gamma - R_{C_I}.\Delta I_{CC_I} \quad (\text{III.23})$$

$$\Delta V_{CC_R} = k.a.\cos\phi_R^\circ.\Delta V_{CA_R} - k.a.V_{CA_R}^\circ.\text{sen}\phi_R^\circ.\Delta\phi_R \quad (\text{III.24})$$

$$\Delta V_{CC_I} = k.a.\cos\phi_I^\circ.\Delta V_{CA_I} - k.a.V_{CA_I}^\circ.\text{sen}\phi_I^\circ.\Delta\phi_I \quad (\text{III.25})$$

$$\Delta P_{CC_R} = I_{CC_R}^\circ.\Delta V_{CC_R} + V_{CC_R}^\circ.\Delta I_{CC_R} \quad (\text{III.26})$$

$$\Delta P_{CC_I} = I_{CC_I}^\circ.\Delta V_{CC_I} + V_{CC_I}^\circ.\Delta I_{CC_I} \quad (\text{III.27})$$

$$\Delta Q_{CC_R} = I_{CC_R}^\circ.\text{tg}\phi_R^\circ.\Delta V_{CC_R} + V_{CC_R}^\circ.\text{tg}\phi_R^\circ.\Delta I_{CC_R} + V_{CC_R}^\circ.I_{CC_R}^\circ.(1+\text{tg}^2\phi_R^\circ).\Delta\phi_R \quad (\text{III.28})$$

$$\Delta Q_{CC_I} = I_{CC_I}^\circ.\text{tg}\phi_I^\circ.\Delta V_{CC_I} + V_{CC_I}^\circ.\text{tg}\phi_I^\circ.\Delta I_{CC_I} + V_{CC_I}^\circ.I_{CC_I}^\circ.(1+\text{tg}^2\phi_I^\circ).\Delta\phi_I \quad (\text{III.29})$$

$$\frac{d}{dt}\Delta I_{CC_R} = \frac{1}{L}.(\Delta V_{CC_R} - \Delta V_{CC_I}) - \frac{R_{CC}}{L}.\Delta I_{CC_R} \quad (\text{III.30})$$

$$\Delta I_{CC_R} = \Delta I_{CC_I} \quad (\text{III.31})$$

Na Seção III.4, temos as equações de controle do elo CCAT, cabe ao usuário definir o modo de operação, controle de corrente ou controle de potência no retificador, fig. III.15 e fig. III. 16 . Como definido anteriormente, o controle de  $\gamma$  no inversor pode ser representado de forma aproximada,  $\Delta\gamma=0$ .

Para o controle de corrente, obtemos as seguintes equações linearizadas:

$$\frac{d}{dt} \Delta x = Ki. (\Delta I_{CC_R} - \Delta I_{ord} + \Delta I_{mod}) \quad (III.32)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta \alpha = \frac{\Delta x}{T} - \frac{\Delta \alpha}{T} + \frac{Kp}{T}. (\Delta I_{CC_R} - \Delta I_{ord} + \Delta I_{mod}) \quad (III.33)$$

Com controle de Potência, temos:

$$\frac{d}{dt} \Delta x = Ki. \left[ \Delta I_{CC_R} - \left( \left( \frac{\Delta P_{ord} + \Delta P_{mod}}{V_{CC_o}} \right) - \frac{P_{ord}}{V_{CC_o}^2} \cdot \Delta V'_{CC_R} \right) + \Delta I_{mod} \right] \quad (III.34)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta \alpha = \frac{\Delta x}{T} - \frac{\Delta \alpha}{T} + \frac{Kp}{T} \cdot \left[ \Delta I_{CC_R} - \left( \left( \frac{\Delta P_{ord} + \Delta P_{mod}}{V_{CC_o}} \right) - \frac{P_{ord}}{V_{CC_o}^2} \cdot \Delta V'_{CC_R} \right) + \Delta I_{mod} \right] \quad (III.35)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta V'_{CC_R} = \frac{\Delta V_{CC_R}}{T_m} - \frac{\Delta V'_{CC_R}}{T_m} \quad (III.36)$$

As equações de Injeções de Corrente nos terminais CC, devem também ser introduzidas na estrutura da Matriz Jacobiana Aumentada. A corrente eficaz injetada nos barramentos CC/CA do sistema é definida pela seguinte expressão:

$$I_{CA} = \frac{P_{CC} - jQ_{CC}}{V_{CA_{RE}} - jV_{CA_{IM}}} \quad (III.37)$$

Separando a equação (III.37) nos eixos real e imaginário, tem-se:

$$I_{CA_{RE}} = \frac{P_{CC} \cdot V_{CA_{RE}} + Q_{CC} \cdot V_{CA_{IM}}}{V_{CA_{RE}}^2 + V_{CA_{IM}}^2} \quad (III.38)$$

$$I_{CA_{IM}} = \frac{P_{CC} \cdot V_{CA_{IM}} - Q_{CC} \cdot V_{CA_{RE}}}{V_{CA_{RE}}^2 + V_{CA_{IM}}^2} \quad (III.39)$$

Substituindo-se os termos  $P_{cc}$  e  $Q_{cc}$  pelas expressões (III.9) e (III.10) e linearizando-se as equações (III.38) e (III.39), obtêm-se as equações que são incluídas na Matriz Aumentada:

$$\Delta I_{CA_{RE}} = \frac{\partial I_{CA_{RE}}}{\partial V_{CC}} \cdot \Delta V_{CC} + \frac{\partial I_{CA_{RE}}}{\partial I_{CC}} \cdot \Delta I_{CC} + \frac{\partial I_{CA_{RE}}}{\partial \phi} \cdot \Delta \phi + \frac{\partial I_{CA_{RE}}}{\partial V_{CA_{RE}}} \cdot \Delta V_{CA_{RE}} + \frac{\partial I_{CA_{RE}}}{\partial V_{CA_{IM}}} \cdot \Delta V_{CA_{IM}} \quad (III.40)$$

$$\Delta I_{CA_{IM}} = \frac{\partial I_{CA_{IM}}}{\partial V_{CC}} \cdot \Delta V_{CC} + \frac{\partial I_{CA_{IM}}}{\partial I_{CC}} \cdot \Delta I_{CC} + \frac{\partial I_{CA_{IM}}}{\partial \phi} \cdot \Delta \phi + \frac{\partial I_{CA_{IM}}}{\partial V_{CA_{RE}}} \cdot \Delta V_{CA_{RE}} + \frac{\partial I_{CA_{IM}}}{\partial V_{CA_{IM}}} \cdot \Delta V_{CA_{IM}} \quad (III.41)$$

### III.7 - Conclusão:

Neste capítulo apresentamos toda a modelagem de elos de corrente contínua, desde as equações que representam as estações conversoras e a linha CC, como também as equações que modelam os sistemas de controle.

Os sinais estabilizadores de modulação de potência ou corrente, utilizados para o amortecimento de oscilações eletromecânicas, foram descritos objetivando a inclusão dos elos CCAT no estudo da estabilidade dinâmica do sistema.

No capítulo seguinte, apresenta-se o desenvolvimento do algoritmo para o projeto coordenado de controladores em sistemas de potência, agora considerando um sistema de transmissão em corrente contínua.



# Capítulo IV

## Projeto Coordenado de Controladores

### IV.1 - Introdução:

Com o conjunto de equações que descrevem o sistema elétrico de potência devidamente linearizadas, calcula-se a matriz aumentada e todos seus autovalores associados, permitindo desta forma identificar a posição dos modos eletromecânicos no plano complexo.

Quando os modos são pouco amortecidos ou mesmo com amortecimento negativo, busca-se através do projeto coordenado de controladores garantir uma localização conveniente para os autovalores, de forma a aumentar o amortecimento dos modos eletromecânicos que dominam a resposta do sistema.

Com este objetivo, utilizam-se técnicas de posicionamento de pólos, que visam uma alocação adequada dos modos eletromecânicos, permitindo o ajuste coordenado dos controladores instalados. Os algoritmos de posicionamento de pólos que podem ser encontrados na literatura, usualmente utilizam a matriz de estados [6] e [8]. Uma outra

formulação que é conhecida, utiliza a matriz jacobiana aumentada (Seção II.3), reunindo vantagens como a alta esparsidade e a preservação da identidade das variáveis de estado e algébricas. Como consequência, a implantação de sinais adicionais para o projeto de controladores é facilitada, especialmente quando o controlador utiliza um sinal que é uma combinação de variáveis de estado e algébricas, tais como frequência da barra e a potência elétrica.

O problema do ajuste coordenado de controladores em um sistema multimáquinas é certamente complexo, buscam-se no aproveitamento de técnicas de controle linear [32], instrumentos que tenham aplicabilidade à solução deste, como algoritmos para o posicionamento de pólos. Estudos recentes como em [6], [7] e [8] definem bem esta teoria, como também a sua aplicação a sistemas elétricos de potência.

Neste trabalho, apresenta-se um algoritmo para o posicionamento de pólos utilizando-se a matriz aumentada, visto que em sistemas elétricos de grande porte há a necessidade da formulação de um algoritmo que utilize a matriz aumentada sem a formação da matriz de estados, como originalmente proposto em [7].

Os controladores implementados tanto para ESP's, Compensadores Estáticos de Reativo e agora para Elos CCAT são usualmente de segunda ordem e podem utilizar qualquer sinal que dependa de variáveis de estado e/ou algébricas.

## IV.2 - Formulação do Algoritmo:

Seja o Sistema de Potência linearizado representado por:

$$\Delta x = J_1 \cdot \Delta x + J_2 \cdot \Delta z + B_1 \cdot \Delta u \quad (\text{IV.1})$$

$$0 = J_3 \cdot \Delta x + J_4 \cdot \Delta z + B_2 \cdot \Delta u \quad (\text{IV.2})$$

$$\Delta y = C_1 \cdot \Delta x + C_2 \cdot \Delta z \quad (\text{IV.3})$$

onde  $x$  : vetor de variáveis de estado;  
 $z$  : vetor de variáveis algébricas;  
 $u$  : vetor de variáveis de entrada;  
 $y$  : vetor de variáveis de saída;  
 $B_1, B_2$  : matrizes de entradas;  
 $C_1, C_2$  : matrizes de saídas;

$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$  : matriz aumentada .

A função de transferência em *malha aberta*  $M(s)$  que relaciona as variáveis de entrada  $u$  e as variáveis de saída  $y$ , é obtida através da transformada de Laplace no conjunto de equações (IV.1) a (IV.3), sendo expressa da seguinte forma:

$$M(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = [c_1 \ c_2] \cdot \begin{bmatrix} sI - J_1 & -J_2 \\ -J_3 & -J_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.4})$$

Através da compensação dinâmica da saída  $H(s)$  como mostra a fig. IV.1, obtemos uma função de transferência em *malha fechada*, representada através da equação (IV.5) :

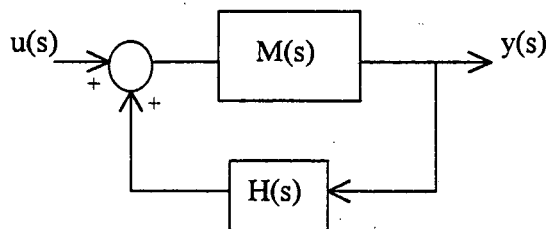


Fig. IV.1 - Sistema com Realimentação.

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{M(s)}{1 - M(s).H(s)} \quad (\text{IV.5})$$

Para obtermos os pólos do sistema em malha fechada, necessitamos da equação característica da equação (IV.5) :

$$1 - M(s).H(s) = 0 \quad (\text{IV.6})$$

No sentido de determinar a estrutura de  $H(s)$  que posicione um autovalor  $\lambda$  especificado em malha fechada, resolve-se a equação (IV.6), fazendo-se  $s=\lambda$  e isolando-se  $H(\lambda)$ , temos assim:

$$H(\lambda) = \frac{1}{[c_1 \ c_2] \begin{bmatrix} \lambda I - J_1 & -J_2 \\ -J_3 & -J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}} \quad (\text{IV.7})$$

Com relação a equação (IV.7), as seguintes observações fazem-se necessárias :

- Utiliza-se um compensador dinâmico de segunda ordem, que admite dois pólos reais iguais e dois zeros reais também iguais:

$$H(s) = k \cdot \frac{(1 + s.T_1)^2}{(1 + s.T_2)^2} \quad (\text{IV.8})$$

onde :  $k$  e  $T_1$  são calculados

$T_2$  é especificada

No caso de considerar-se no projeto do controlador um bloco *Wash-Out*, inclui-se normalmente na equação (IV.8) , especificando a constante de tempo  $T_w$ .

- Adota-se um *Controle Descentralizado*, como comumente utilizado em Sistemas de Potência, onde as saídas de cada componente são realimentadas apenas às suas próprias entradas . Assim, os vetores  $[c_1 \ c_2]$  e  $[b_1 \ b_2]^t$  terão um ou poucos elementos diferentes de zero, o que favorece a utilização de um ou alguns elementos da inversa do denominador da equação (IV.7).

- Se o autovalor em malha fechada a ser posicionado, for um número complexo  $\lambda = \sigma + j\omega$ , substituindo-se  $H(\lambda)$  da equação (IV.8) na equação (IV.7) obtemos

$$k \cdot [1 + \lambda \cdot T_1]^2 = \alpha + j\beta \quad (IV.9)$$

onde  $\alpha + j\beta$  é o número complexo que resulta da substituição de  $s$  pelo autovalor desejado.

O desmembramento desta equação em parte real e imaginária, resulta em duas equações e duas incógnitas ( $k$  e  $T_1$ ), já que a constante de atraso de fase  $T_2$  é especificada:

$$C_1 \cdot T_1^2 + C_2 \cdot T_1 - \beta = 0 \quad (IV.10)$$

$$k = \frac{\alpha}{(1 + C_3 \cdot T_1 + C_4 \cdot T_1^2)} \quad (IV.11)$$

onde :  $C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$  são constantes.

Observa-se que a equação (IV.10) admite duas soluções para  $T_1$ , levando a equação (IV.11) a admitir duas soluções para  $k$ , visto que a equação (IV.10) é uma função quadrática.

- Se o autovalor a ser posicionado for um número real  $\lambda=\sigma$ , a equação (IV.9) resulta em:

$$(k - \alpha) + 2.k.\sigma.T_1 + k.\sigma^2.T_1^2 = 0 \quad (IV.12)$$

que contrariando o caso anterior, onde tínhamos  $\alpha+j\beta$ , o fato de  $\beta=0$  resulta num sistema subdeterminado de uma equação e duas incógnitas. A solução para a equação (IV.12) se faz através da especificação de uma das duas incógnitas, isto é especifica-se o ganho  $k$  do controlador e calcula-se  $T_1$  ou vice-versa.

- No caso de utilização de uma estrutura diferente da equação (IV.8), determina-se uma equação similar à equação (IV.9) e aplica-se a formulação do algoritmo.

### IV.3 - O Algoritmo para Posicionamento de Pólos:

O algoritmo para o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores visando o posicionamento dos  $n$  autovalores em um sistema multimáquinas de  $m$  máquinas, que considera as interações dinâmicas entre as máquinas e utiliza a técnica de posicionamento de pólos através da compensação dinâmica da saída, é representado através dos passos a seguir:

**Passo 1** - Formar a matriz aumentada, sendo esta calculada em um ponto de operação determinado pelo fluxo de potência.

**Passo 2** - Para  $i=1, \dots, n$ , especificar os autovalores a serem posicionados ( $\lambda_i$ ). Especifica-se também os valores iniciais para controladores em projeto e a tolerância.

**Passo 3** - Para cada  $i=1, \dots, n$ , utilizando-se os últimos valores para  $T_{ii}$  e  $k_i$ , forma-se a equação:

$$H_i = \frac{1}{\begin{bmatrix} c_{1_i} & c_{2_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_i \cdot I_i - J_{1_i} & -J_{2_i} \\ -J_{3_i} & -J_{4_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_{1_i} \\ b_{2_i} \end{bmatrix}}$$

e resolve-se para  $T_{ii}$  e  $k_i$ .

**Passo 4** - Se para  $i=1, \dots, n$ ,  $\Delta T_{ii}$  e  $\Delta k_i$  estiverem dentro de uma tolerância pré-especificada, ir para o **Passo 5**, se não retornar para o **Passo 3**.

**Passo 5** - Formar a matriz aumentada com todos os controladores projetados e calcular todos os autovalores do sistema compensado.

Esse algoritmo é o mesmo proposto na referência [7], onde se utiliza também a fig. IV.2 para a representação do algoritmo.

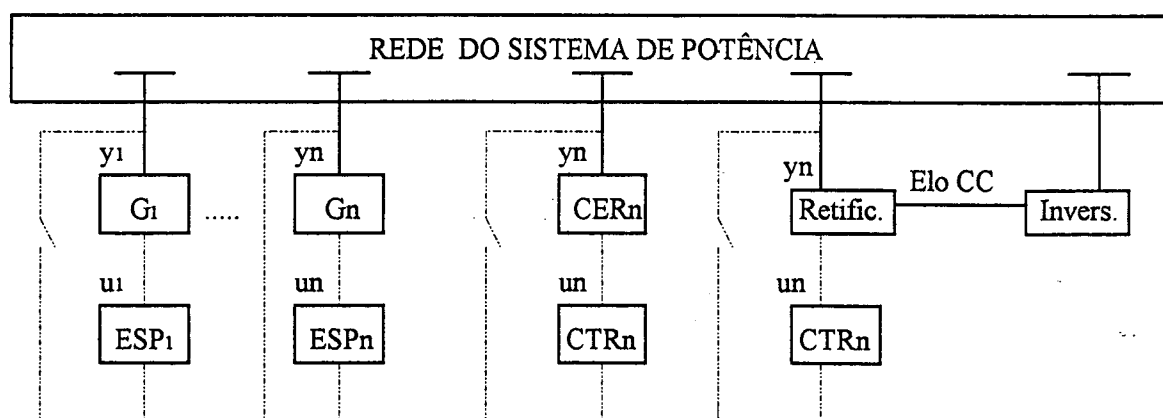


Fig. IV.2 - Representação do Algoritmo de Posicionamento de Pólos.

A idéia básica do método é abrir uma malha de controle  $i$  e projetar os parâmetros do seu controlador, com as outras malhas fechadas. Calculados os parâmetros

do controlador  $i$ , fecha-se esta malha e passa-se a projetar o controlador  $i+1$  de forma similar ao controlador  $i$ . Este processo é repetido até o último controlador ser calculado, quando se volta ao controlador  $i$ . O processo se repete até que a diferença dos parâmetros calculados para os controladores entre duas iterações sucessivas fique dentro da tolerância especificada.

Como o método considera as interações dinâmicas existentes num sistema multimáquinas, os parâmetros dos controladores previamente calculados, visando posicionar um dado modo eletromecânico, são perturbados quando as outras malhas são fechadas. O processo é iterativo até alcançar uma dada tolerância, resultando num ajuste coordenado dos controladores projetados e mostrando-se um algoritmo bastante versátil.

Outras considerações a respeito deste algoritmo podem ser encontradas em [7], pois o objetivo deste trabalho é a utilização do algoritmo para o projeto de controladores incluindo o controlador que efetua a modulação de potência ou corrente em elos de corrente contínua.

#### IV.4 - Conclusão:

Neste capítulo foi apresentado o algoritmo de posicionamento de pólos que utiliza a matriz aumentada, para o projeto coordenado de controladores incluindo os elos de corrente contínua.

Os controladores projetados, constituem uma estrutura clássica, usualmente empregada em sistemas de potência, e consistem de um ganho  $K$  e duas funções de avanço-atraso idênticas, combinadas com ou sem um filtro *Wash-Out*.

No próximo capítulo, os resultados da aplicação deste algoritmo em dois sistemas exemplo são apresentados na forma de análise linear e simulação não-linear no tempo.



# Capítulo V

## Resultados Numéricos

### V.1 - Introdução:

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o algoritmo para o posicionamento de pólos, formalizado no Capítulo IV e permitindo o projeto coordenado dos controladores em um sistema multimáquinas, incluindo agora o controle suplementar em sistemas de transmissão em corrente contínua.

Foram efetuados projetos de sinais de modulação de corrente e potência ativa para os elos CCAT, bem como projetos coordenados destes sinais de modulação com sinais estabilizadores de sistemas de potência (ESP's) derivados da velocidade ( $\omega$ ), utilizando uma nova versão do programa *CCSP* (Cálculo de Controladores em Sistemas de Potência) desenvolvida com esta finalidade. A versão original foi desenvolvida em [7], aproveitando diversos procedimentos elaborados em [4]. Para o cálculo de autovalores e fatores de participação utilizou-se o programa *EIGEN*, desenvolvido em [4] e adaptado

para a inclusão de sistemas de transmissão CCAT. Para a simulação não-linear dos controladores projetados utilizou-se o programa *ANATEM* desenvolvido pelo CEPEL.

A avaliação dos resultados utiliza dois sistemas CA/CC: O Sistema 1 possui três geradores, nove barras e um elo CCAT [23]. O Sistema 2 corresponde ao equivalente Sul-Sudeste Brasileiro, que possui seis máquinas, dez barras e o sistema CCAT de Itaipu [22]. Todos os dados referentes a estes sistemas são encontrados no Apêndice A.

Uma breve descrição dos programas implementados e utilizados neste trabalho é apresentada no Apêndice B.

## V.2 - Análise dos Resultados:

A avaliação da estabilidade dinâmica dos dois sistemas CA/CC exemplo, é realizada através da análise dos autovalores associados aos modos eletromecânicos destes sistemas ( $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$ ). A identificação dos modos de oscilação instáveis ou pouco amortecidos, utiliza como indicadores:

- A parte real dos autovalores ( $\sigma_i$ );
- O Fator de Amortecimento ( $\xi = \sigma_i / \sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}$ );

Para Sistemas de Potência, considera-se aceitável um fator de amortecimento em torno de 5%, correspondendo a uma atenuação do modo de oscilação no tempo da ordem de 27% entre picos sucessivos [15]. Para a identificação dos elementos do sistema que mais contribuem para estes modos de oscilação críticos, utilizam-se os Fatores de Participação, que permitem identificar as variáveis de estado que tenham uma maior influência sobre um determinado modo de oscilação, definindo os elementos dinâmicos

mais indicados para a introdução de estabilização suplementar, para melhorar o desempenho dinâmico do sistema.

### V.3 - Descrição do Sistema 1 CA/CC:

O diagrama unifilar do sistema 1 é apresentado na fig. V.1, este sistema corresponde ao sistema da referência [33], considerando a existência de um elo CCAT como na referência [23].

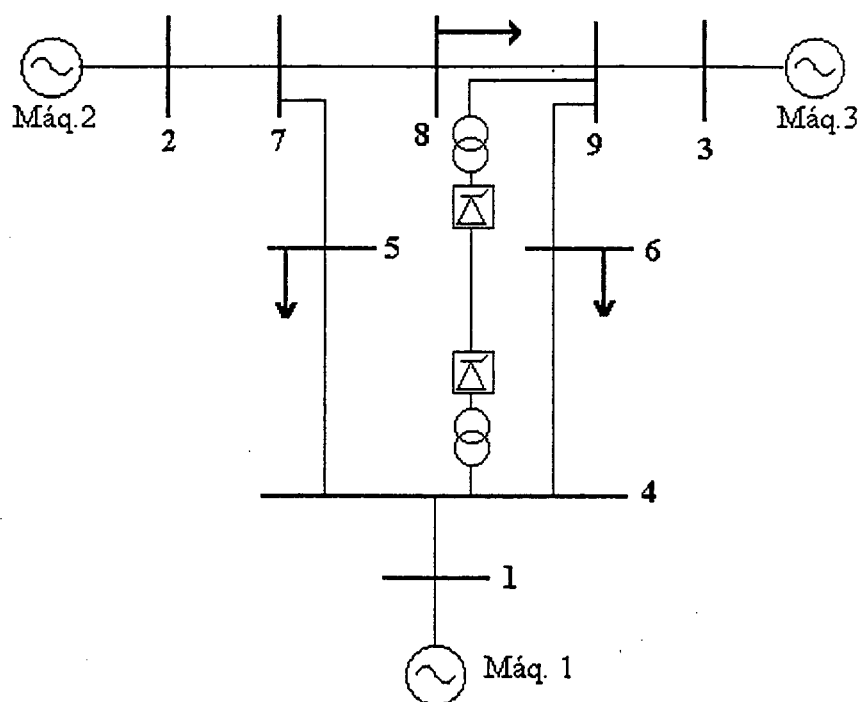


Fig. V.1 - Diagrama Unifilar do Sistema 1 CA/CC.

Neste sistema utilizou-se o Modelo 2 ("Salient Poles") para a Máquina 1 e o Modelo 3 ("Round Rotor") para as Máquinas 2 e 3, detalhes a respeito destes modelos encontram-se bem documentados no Apêndice A da referência [7]. Os sistemas de

excitação de todas as máquinas utilizam o Modelo DC1 (IEEE), que é ilustrado no Apêndice A. As cargas são modeladas com a característica de impedância constante.

O elo CCAT foi representado de acordo com a Modelagem do Capítulo III, considerando o Controle de Corrente no Retificador e um Controle de Gama Constante no Inversor ( $\Delta\gamma = 0$ ). A condição de operação do sistema CC, assume valores iniciais de forma que os fluxos de potência CA não sofram alterações, mesmo depois da inclusão do elo CCAT, isto é, no sistema CC não existe fluxo de potência ativa neste ponto de operação.

### V.3.1 - Projeto de Controladores para o Sistema 1 CA/CC:

Para o ponto de operação considerado para este sistema e com a ausência de sinais estabilizadores nos geradores e no elo CCAT, os autovalores dominantes e os componentes que mais contribuem para cada modo de oscilação eletromecânico em malha aberta, são apresentados na Tabela V.1.

Tab. V.1 - Modos Eletromecânicos em Malha Aberta,  
para o Sistema 1 CA/CC.

Autovalor	$\xi(\%)$	Fator de Participação
$-0.7050 \pm j 12.8822$	5.46	Máquina 3
$-0.1773 \pm j 8.3220$	2.13	Máquina 2

Observa-se que os autovalores que dominam a resposta do sistema são todos estáveis, mas pouco amortecidos, principalmente o modo associado à máquina 2. Com o objetivo de melhorar o amortecimento dos mesmos, faz-se o projeto do controlador para o elo CCAT, utilizando uma realimentação da diferença de frequência entre as barras retificadora e inversora ( $\Delta f_{r,i}$ ) na malha de controle de corrente no retificador, executando a

Modulação de Corrente. A estrutura do controlador para a modulação de corrente é representado pela equação (IV.8), acrescida de um bloco *Wash-Out*.

Com as constantes  $T_2$  e  $T_w$  especificadas, o projeto define o valor do ganho  $K$  e a constante de tempo  $T_1$  para o posicionamento exato do autovalor, de forma a alcançar-se o amortecimento desejado, como mostra a Tabela V.2.

Tab.V.2 - Resultado do Projeto do Controlador para  
Modulação de Corrente no Elo CCAT.

Autovalor Especificado	$\xi$ (%)	Parâmetros do Controlador	Iterações
$-2.1500 \pm j 13.4000$	15.84	$K = -102.746$ $T_1=0.1238$ $T_2=0.05$ $T_w=10.0$	2

Cabe ressaltar que o projeto para alocação do autovalor associado à máquina 3, além de melhorar o seu amortecimento, contribuiu para que o autovalor associado à máquina 2 e com um baixíssimo amortecimento, também fosse realocado ( $\lambda_{\text{máq.2}} = -1.0448 \pm j8.3193$ ), melhorando consideravelmente o seu amortecimento ( $\xi = 12.46\%$ ).

Com a finalidade de mostrar a aplicação do algoritmo proposto para o ajuste coordenado de controladores, realizou-se o projeto coordenado de um ESP derivado da velocidade ( $\omega$ ) para a Máquina 2 com um controlador idêntico ao projetado anteriormente para a Modulação de Corrente no Elo CCAT, obtendo-se resultados satisfatórios, como mostra a Tabela V.3 .



Para este sistema, todas as máquinas foram representadas pelo Modelo 4 ("Q-Axis Subtransient"), os sistemas de excitação de todas as máquinas utilizam o Modelo ST1 (IEEE). As cargas, foram modeladas conforme as características apresentadas no Apêndice A . A modelagem do Elo CCAT de Itaipu segue a representação apresentada anteriormente, com uma condição de operação na qual existe fluxo de potência ativa entre as barras CA/CC do sistema.

#### V.4.1 - Projeto de Controladores para o Sistema 2 CA/CC:

A Tabela V.4 mostra os modos eletromecânicos dominantes do sistema 2, sem a utilização de sinais estabilizadores.

Tab. V.4 - Modos Eletromecânicos em Malha Aberta  
para o Sistema 2 CA/CC.

Autovalor	$\xi$ (%)	Fator de Participação
$0.5347 \pm j 3.4842$	-15.17	Máquina 10
$-0.2341 \pm j 5.6098$	4.17	Máquina 3
$-1.8048 \pm j 9.1957$	19.26	Máquina 2
$-2.0191 \pm j 9.1733$	21.50	Máquina 1

Para um ponto de operação definido, o sistema 2 apresenta um autovalor instável,  $\lambda = 0.5347 \pm j 3.4842$  , cuja frequência de oscilação (0.55 Hz) caracteriza um *modo inter-área*. O amortecimento deste modo instável pode ser obtido através de uma realimentação de sinais de estabilização nos sistemas de excitação das máquinas e/ou no controle de corrente (ou potência) do sistema CCAT.

Como na Seção V.3.1, efetuou-se primeiramente o projeto do controlador para a Modulação da Corrente no elo CCAT, só que neste caso utilizamos como

realimentação o sinal da tensão na barra 4, conforme a referência [22]. A Tabela V.5 mostra os parâmetros obtidos para o posicionamento do autovalor especificado no projeto.

Tab. V.5 - Resultado do Projeto do Controlador para Modulação de Corrente do Elo CCAT do Sistema 2.

Autovalor Especificado	Parâmetros do Controlador	Iterações
$-0.3000 \pm j 3.5000$	$K = -273.064$ $T1=0.403$ $T2=0.16$ $Tw=3.0$	2

O projeto para a alocação do autovalor associado à máquina 10, além de alcançar o primeiro objetivo, que era o amortecimento deste modo de oscilação crítico, contribuiu para melhoria do amortecimento de todos os outros autovalores. A Tabela V.6 mostra os modos eletromecânicos, com a estabilização através da modulação de corrente.

Tab. V.6 - Modos Eletromecânicos em Malha Fechada, com o Projeto do Controlador para a Modulação de Corrente.

Autovalor	$\xi$ (%)	Fator de Participação
$-0.3000 \pm j 3.5000$	8.50	Máquina 10
$-1.8060 \pm j 9.1894$	19.28	Máquina 2
$-2.0112 \pm j 9.1715$	21.42	Máquina 1

Neste caso, não se efetuou o projeto coordenado de controladores, visto que todos os autovalores deste sistema apresentaram-se bem amortecidos, dispensando a utilização de outra malha de estabilização.



### V.5 - Simulação Não-Linear no Tempo:

Nesta seção, são representados graficamente os resultados obtidos apartir de simulações não-lineares obtidas somente com o sistema 2 CA/CC, uma vez que não dispúnhamos de uma versão do programa *ANATEM* (CEPEL) para uso técnico.

Com o auxílio de um caso-base, conseguiu-se efetuar simulações não-lineares para o sistema em malha aberta e malha fechada. Para o caso em malha fechada utilizou-se o controlador obtido através do projeto para Modulação de Corrente no elo CCAT, operando sob o regime de corrente constante (Tab. V.5).

As simulações efetuadas para exprimir o comportamento dinâmico do sistema, diante um degrau de +1% aplicado na referência do regulador de tensão do gerador 4 (Itaipu 60Hz) são mostradas nas figuras V.3 e V.4.

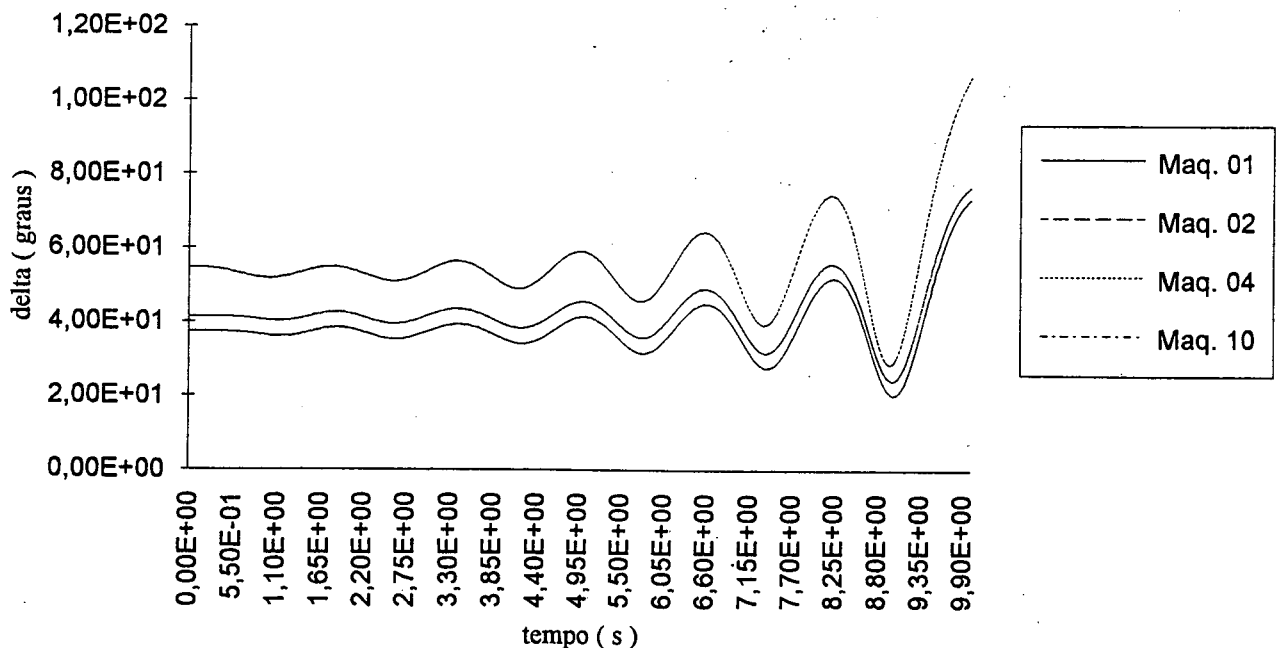


Fig. V.3 - Simulação não-linear para o sistema em malha aberta.

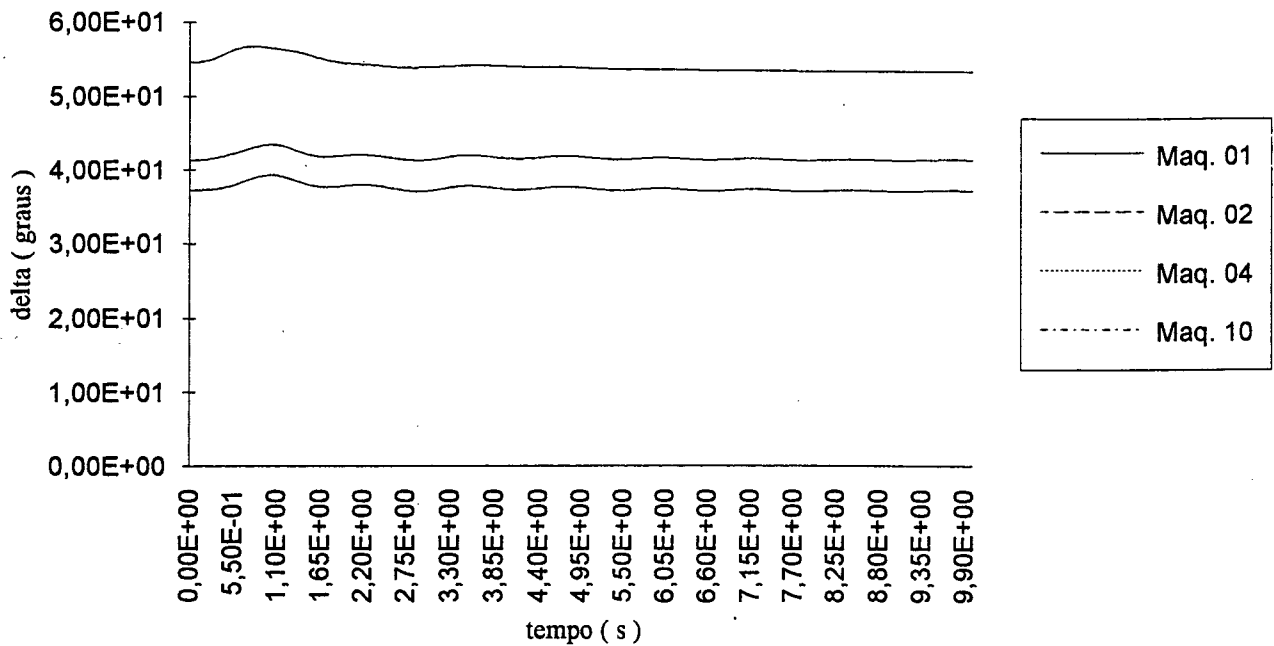


Fig. V.4 - Simulação não-linear para o sistema com Modulação de corrente no Elo CCAT.

## V.6 - Conclusão:

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos através do projeto de controladores em dois sistemas CA/CC, demonstrando a eficácia da Modulação de Corrente(Potência) em Elos CCAT, na melhoria do desempenho dinâmico dos dois sistemas CA/CC.

Utilizou-se para o projeto dos mesmos, o algoritmo de posicionamento de pólos apresentado no capítulo IV. O método foi validado através do cálculo de todos os autovalores em malha fechada para os dois sistemas teste e de simulação não- linear para o

segundo sistema, visto termos limitações ao acesso de pacotes para análise da estabilidade transitória de sistemas que incluem elos CCAT.

O critério utilizado para o posicionamento dos pólos, visando melhorar o amortecimento, foi diminuir sensivelmente a parte real do modo eletromecânico e mantendo-se a frequência de oscilação do mesmo numa faixa praticamente constante. Desta forma, todos os pólos foram exatamente alocados nas posições desejadas em menos de 5 iterações, empregando-se uma tolerância de 0.001 .

No próximo capítulo, são apresentadas conclusões gerais a respeito do que foi desenvolvido neste trabalho, como também sugestões e recomendações para futuros trabalhos.

# Capítulo VI

## Conclusão Geral

A instalação de sinais adicionais nos sistemas de excitação de geradores, nos compensadores estáticos de reativos e nos sistemas de controle de elos de corrente contínua, contribui de modo eficaz para o amortecimento de oscilações eletromecânicas em sistemas elétricos de potência. O projeto coordenado destes controladores, como é proposto neste trabalho, utiliza o método de posicionamento de pólos por realimentação das saídas, proposto originalmente em [8]. Com o objetivo de validar este método, realizou-se o projeto coordenado de controladores para dois sistemas, incluindo elos CCAT.

Como o algoritmo é formulado empregando-se a matriz aumentada, explorando sua alta esparsidade para a alocação dos pólos, o método apresenta as seguintes vantagens:

- Aplicação para projeto de controladores em sistemas de grande porte.

- A utilização por parte dos controladores em projeto, de sinais suplementares derivados de variáveis de estado ou uma combinação dessas com variáveis algébricas, cujas identidades são preservadas.
- Implementação computacional do algoritmo é eficiente, tendo em vista a alta esparsidade da matriz jacobiana aumentada e dos vetores B de entrada e C de saída.
- O projeto de controladores utilizando esta abordagem permite uma maior flexibilidade quanto à modelagem de diversos componentes do sistema elétrico.

Fazendo-se uma escolha adequada da posição do autovalor a ser especificado, o algoritmo apresenta o posicionamento exato de pólos em um número baixo de iterações. Outra característica é a forte influência da posição especificada para o pólo a ser alocado sobre os parâmetros dos controladores projetados.

Outra recomendação, é quanto às condições iniciais; Sugere-se que os valores iniciais para os parâmetros dos controladores em projeto sejam valores típicos, favorecendo assim um número baixo de iterações, pois as equações quadráticas (IV.10) e (IV.12) exigem a escolha de uma ou outra solução, e estas soluções dependem das condições iniciais na primeira iteração.

Para o deslocamento de um modo eletromecânico de interesse, se fez primeiramente o fechamento de uma malha de estabilização no elo CCAT (Modulação de Potência ou Corrente). Para alocação de outro modo eletromecânico, agora com o fechamento de uma malha de estabilização em um gerador, utilizou-se como critério de localização do ESP, os fatores de participação. Definidos os controles suplementares, efetivou-se o projeto e o ajuste coordenado destes controladores para os dois sistemas-teste. Não foi explorada a possibilidade de posicionamento de outros autovalores além dos modos eletromecânicos, uma vez que os mesmos mantiveram um comportamento estável, com casos em que o amortecimento foi até melhorado.

De maneira geral, conclui-se que a implementação de elos CCAT no algoritmo, mostrou através do projeto de controladores, que modulações de corrente (potência) agem de forma eficaz na melhoria do desempenho dinâmico de sistemas CA/CC. Observou-se também que projeto coordenado de controladores como ESP's e modulações em elos CCAT pode ser efetivado, mostrando a flexibilidade desta metodologia.

#### Sugestões e recomendações para futuros trabalhos:

- Implementação no projeto coordenado de controladores, de modelos multiterminais de elos CCAT, como também a utilização de outras estruturas de controladores.
- Inclusão no projeto coordenado de controladores, de outros componentes do sistema de potência, entre eles os dispositivos FACTS.
- Desenvolvimento de uma versão integrada dos programas *LFACDC*, *EIGEN* e *CCSP* em um único ambiente, de forma a permitir o projeto de controladores e a análise linear de um sistema elétrico de potência, utilizando um único banco de dados e modelos dos elementos do sistema. Para a análise não-linear do SEP, com a inclusão de elos CCAT, precisar-se-ia incluir todas as equações dinâmicas deste sistema no programa *SIMUL*, que foi desenvolvido em [4], permitindo a análise da estabilidade transitória através de simulações não-lineares no tempo.

## Bibliografia

- [1] Larsen, E. V. Swann, D.A. (1981) - *Applying Power System Stabilizers*. I,II e III, IEEE Trans. on Power System.
- [2] Martins, N. (1986) - *Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small-Signal Stability Studies*. IEEE Trans. on Power System PWRS-1, pp 217-226.
- [3] Martins, N. Lima, L.T.G. (1990) - *Determination of Suitable Location for Power System Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems*. IEEE Trans. on Power System, PWRS-5, vol. 4, pp 1455-1469.
- [4] Silveira e Silva, A. (1990) - *Placement and Control of Static Compensators for Power System Stability*. Ph.D. Thesis, UMIST, U.K.

- [5] Peña, H.E. (1992) - *Controle Descentralizado Ótimo para o Projeto e Coordenação de Sinais Estabilizadores de Sistemas de Potência*. Tese de Doutorado, UFSC.
- [6] Teive, R.G. (1991) - *Ajuste Coordenado dos Sinais Estabilizadores em Sistemas de Potência Multimáquina*. Tese de Mestrado, UFSC.
- [7] Aramayo, V.R.U. (1992) - *Ajuste de Sinais Adicionais em Sistemas de Potência, incluindo Compensadores Estáticos de Reativo*. Tese de Mestrado, UFSC.
- [8] Elangovan, S. Lim, C.M. (1987) - *Efficient Pole-Assignment Method for Designing Stabilizers in Multimachine Power Systems*. IEEE Proceedings, vol. 134, Pt. C.
- [9] Barreiros, J.A.L. Silveira e Silva, A. Simões Costa, A.J.A. (1992) - *Estabilizador de Sistema de Potência Adaptativo Auto-Ajustável, com Posicionamento de Pólos usando Método Implícito*. Anais do IX CBA, Vitória- ES, pp 263-267.
- [10] Silveira e Silva, A. Barreiros, J.A.L. (1992) - *Application of Adaptive Controllers to a Multimachine Power System*. LATINCON '92, Santiago, Chile.
- [11] Kimbark, E.W. (1971) - *Direct Current Transmission*. vol. I, John Wiley and Sons Inc., New York, USA.
- [12] Arrillaga, J. (1983) - *High Voltage Direct Current Transmission*. IEE Power Engineering Series 6, Peter Peregrinus Inc., London, U.K.



- [13] Arrillaga, J. Arnold, C.P. Harker, B.J. (1983) - *Computer Modelling of Electrical Power Systems*. John Wiley and Sons Inc., New York, USA.
- [14] Uhlmann, E. (1975) - *Power Transmission by Direct Current*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, Germany.
- [15] Macedo, N.J.P. (1992) - *Análise e Controle da Estabilidade a Pequenas Perturbações de Sistemas Elétricos de Potência, com Elos de Corrente Contínua e Compensadores Estáticos de Reativo*. Tese de Mestrado, CÔPPE/UFRJ.
- [16] Lopes, J.C. (1982) - *Modelagem de Ligações em Corrente Contínua*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ.
- [17] Mello, F.P. Concórdia, C. (1969) - *Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control*. IEEE PAS, Vol. PAS - 88, pp 316-329.
- [18] Aramayo, V.R.U. Silveira e Silva, A. (1992) - *Ajuste Coordenado de Controladores para Amortecimento em Sistemas de Potência*. Anais do IX CBA, Vitória-ES.
- [19] Dash, P. K. Rahman, M.A. Panda, P.C. (1982) - *Dynamic Analysis of Power with Multiterminal HVDC Links and Static Compensators*. IEEE Trans. on Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No 6, pp 1332-1341.
- [20] Christensen, J. F. et alii (1993) - *Stability Improvement Methods Incorporated in HVDC Links*. Colloquium of Cigré Study Committee 38, Florianópolis-SC, pp. 1.1.1-1.1.6.

- [21] Pilloto, L.A.S. Wey, A. Nilsson, S.L. (1993) - *Coordenation of Converter Modulation Controllers for Multiinfeed HVDC Systems*. Colloquium of Cigré Study Committe 38, Florianópolis-SC, pp. 1.7.1-1.7.5 .
- [22] Martins, N. et alii (1993) - *Proposal for a Benchmark System for Power System Oscillation Analysis and Control*. Colloquium of Cigré Study Committe 38, Florianópolis-SC, pp. 3.1.1-3.1.16 .
- [23] Padiyar, K.R. Pai, M.A. Radhakrishna, C. (1981) - *A Versatile System Model for The Dynamic Stability Analysis of Power Systems Incluind HVDC Links*. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS -100, No 4, pp. 1871-1880.
- [24] Choudhry, M.A. et alii (1986) - *Stability Analysis of a Modulated AC/DC System Using The Eigenvalue Sensitivity Approach*. IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-1, No 2, pp. 128-135.
- [25] Emarah, A.S. Choudhry, M.A. Galanos, G.D. (1987) - *Design of Optimal Modulation Controllers for Multiarea AC/DC Systems Using Eigenalve Sensitivities*. IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-2, No 3, pp. 522-528.
- [26] Grund, C.E. Pohl, R.V. Reeve, J. (1982) - *Control Design of an Active and Reactive Power HVDC Modulation System with Kalman Filtering*. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS- 101, No 10, pp.4100-4111.
- [27] Cresap, R.L. et alii (1978) - *Operating Experience with Modulation of The Pacific HVDC Intertie*. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No 4, pp. 1053-1059.

- [28] Choudhry, M.A. Carrol, D.P. (1984) - *Coordinated Active and Reactive Power Modulation of Multiterminal HVDC Systems*. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No 6, pp.1480-1485.
- [29] Johnson, R.K. et alii (1989) - *Power Modulation of Sidney HVDC Scheme*. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No 4, pp. 2153-2161.
- [30] IEEE Committe Report. (1991) - *HVDC Controls for System Dynamic Performance*. IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No 2, pp. 743-752.
- [31] Rostamkolai, N. et alii (1992) - *Control Design of Santo Tomé Back-To-Back HVDC Link*. IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No 3, pp.1250-1256.
- [32] Chen, C. T. (1984) - *Linear System Theory and Design*. CBS College Publ. , New York, USA.
- [33] Anderson, P. M. Fouad, A. A. (1977) - *Power System Control and Stability*. The Iowa State University Press.
- [34] Hammad, A.E. Gagnon, J. McCallum, D. (1990) - *Improving The Dynamic Performance of Complex AC/DC System By HVDC Control Modifications*. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No 4, pp. 1934-1943.
- [35] Stagg, G.W. El-Abiad, A.H. - *Computer Methods in Power System Analysis*. McGraw Hill, Kogakusha.

- [36] Ramos, D.S. Dias, E.M. - *Sistemas Elétricos de Potência, Regime Permanente*. Vol. 2, Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro-RJ.
- [37] Microsoft Corporation - *Microsoft Pascal Compiler, User's Guide for the MS-DOS Operating System*.
- [38] CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (1987) - *Manual do Programa de Análise de Redes, ANAREDE*.
- [39] CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (1993) - *Manual do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos, ANATEM*.

# **Apêndice A**

## **Dados dos Sistemas**

Neste Apêndice são apresentados os dados dos dois sistemas para os testes e análises do algoritmo proposto no trabalho.

### **A.1 - Sistema 1 CA/CC:**

Corresponde ao sistema de três máquinas e nove barras da referência [33], acrescido de um elo CCAT como ilustrado no Capítulo V e na referência [23].

- **Potência Base : 100 MVA**
- **Frequência : 60 Hz**

**Dados de Barra CA:**

Barra	Tensão		Geração		Carga	
	Módulo	Âng (Graus)	MW	MVAr	MW	MVAr
1	1.0400	0.000	71.641	27.046	0.000	0.000
2	1.0250	9.280	163.000	6.654	0.000	0.000
3	1.0250	4.665	85.000	-10.860	0.000	0.000
4	1.0258	-2.217	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.9956	-3.989	0.000	0.000	125.000	50.000
6	1.0126	-3.687	0.000	0.000	90.000	30.000
7	1.0258	3.720	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.0159	0.727	0.000	0.000	100.000	35.000
9	1.0323	1.967	0.000	0.000	0.000	0.000

**Dados de Linha CA:**

B. Inicial	B. Final	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	4	0.000	0.058	0.000
4	5	0.010	0.085	0.176
4	6	0.017	0.092	0.158
5	7	0.032	0.161	0.306
6	9	0.039	0.170	0.358
2	7	0.000	0.062	0.000
7	8	0.008	0.072	0.149
8	9	0.012	0.101	0.209
9	3	0.000	0.059	0.000

**Dados de Barra CC:**

Barra	Tipo	Tensão (pu)
4	Retificadora	1.1525
9	Inversora	1.1525

**Dados de Linha CC:**

B. Inicial	B. Final	Rcc (pu)	L (pu)
4	9	0.00334	0.00044

**Dados do Conversor:**

Barra CC	Tipo	Pcc (MW)	Tap	Âng. (rad)	Xc (pu)
4	Retificador	0.00	0.8643	0.2575	0.1260
9	Inversor	0.00	0.8643	0.2819	0.0728

**Dados das Máquinas:**

Parâmetros	Máquina 1	Máquina 2	Máquina 3
H (s)	23.640	6.400	3.010
xd (pu)	0.0969	0.8650	1.2580
xd'(pu)	0.0608	0.1200	0.1810
xq (pu)	0.0969	0.8650	1.2580
xq'(pu)	---	0.1970	0.2500
Tdo'(s)	8.9600	6.0000	5.8900
Tqo'(s)	---	0.5350	0.6000
rs (pu)	0.0000	0.0000	0.0000
D[pu/pu]	0.0000	0.0000	0.0000

**Dados do Regulador Automático de Tensão:**

- Modelo DC1 (IEEE) para todas as máquinas.

Ka (pu)	Kf (pu)	Ke (pu)	Ta (s)	Tf (s)	Te (s)	Vr min	Vr máx	Ef 0.75	Ef máx	Se 0.75	Se máx
25.00	0.091	-0.05	0.200	0.350	0.569	-5.00	5.00	14.85	19.80	0.078	0.303

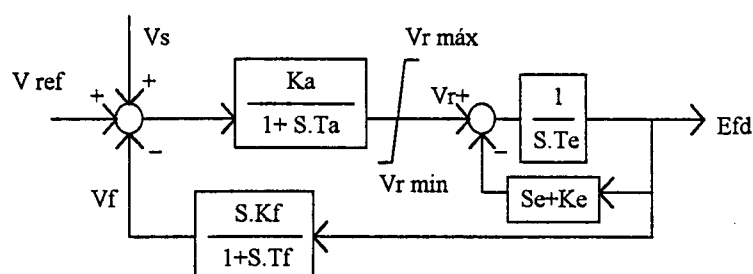


Fig. A.1- Estrutura do Reg. Automático de Tensão.

**Dados do Controle Principal no Retificador do Elo CCAT e do Sinal Adicional:**

Ki (pu)	Kp (pu)	t (s)	tm (s)	K (pu)	T1 (s)	T2 (s)	Tw (s)
5.3344	0.2167	0.0100	0.5000	Ajust.	Ajust.	0.05	10.00

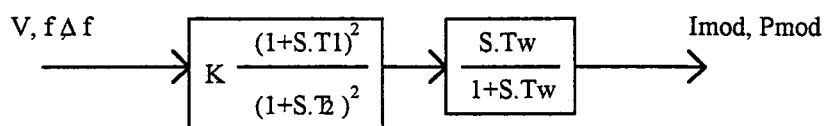


Fig. A.2 - Estrutura do Sinal Adicional.

**Dados do Sinal Adicional Estabilizador (ESP) :**

K (pu)	T1 (s)	T2(s)	Tw(s)	Vs máx	Vs mín
Ajust.	Ajust.	0.05	3.00	0.1	-0.1

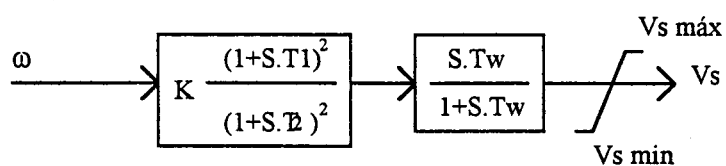


Fig. A.3 - Estrutura do ESP derivado da velocidade.



**A.2 - Sistema 2 CA/CC:**

Corresponde ao sistema equivalente Sul-Sudeste Brasileiro, composto de 6 máquinas e 10 barras, que é apresentado na referência [22].

- **Potência Base : 100 MVA**
- **Frequência : 60 Hz**

**Dados de Barra CA:**

Barra	Tensão		Geração		Carga	
	Módulo	Âng (Graus)	MW	MVAr	MW	MVAr
1	1.0300	41.39	1658.00	-362.947	2405.00	-467.00
2	1.0300	44.09	1332.00	-146.803	692.300	-184.00
3	1.0290	43.47	1540.00	-446.433	688.200	-235.00
4	1.0390	65.74	6500.00	2200.605	62.600	24.300
5	0.9866	38.06	0.000	0.000	845.800	-9.200
6	0.9739	38.31	0.000	0.000	-4.900	79.800
7	0.9410	15.97	0.000	0.000	2884.000	-196.00
8	1.0000	0.00	5200.00	2598.79	0.000	0.000
9	1.1120	-7.07	0.000	0.000	23000.00	-9000.00
10	1.0900	0.00	14921.17	-1477.192	0.000	0.000

Barra	Adm. Shunt
	X (pu)
1	-0.559
2	-0.671
3	-0.877
4	-2.703
5	-3.303
6	-0.047
7	-0.050
8	---
9	---
10	---

**Dados de Linha CA:**

B. Inicial	B. Final	R (pu)	X (pu)
1	3	0.0003	0.0038
2	3	0.0005	0.0076
4	6	0.0003	0.0073
5	1	0.0019	0.0245
5	2	0.0015	0.0225
6	5	---	0.0039
6	7	0.0004	0.0057
7	9	0.0001	0.0050
9	10	---	0.0010

**Características do Sistema de Cargas:**

Barra	Potência Ativa (MW)		
	% P	% I	% Z
1	--	100.0	--
2	--	100.0	--
3	--	100.0	--
4	--	--	100.0
5	--	--	100.0
6	--	--	100.0
7	--	100.0	--
9	25.0	--	75.0

As parcelas MVAr de todas as cargas são modeladas como 100% de Z constante.

**Dados de Barra CC:****Potência Base : 100 MVA****Tensão Base : 2400 KV**

Barra	Tipo	Tensão (pu)
8	Retificadora	1.0000
7	Inversora	0.9622

**Dados de Linha CC:**

B. Inicial	B. Final	Rcc (pu)	L (pu)
8	7	0.00073	0.00010

**Dados do Conversor:**

Barra CC	Tipo	Pcc (MW)	Tap	Âng. (rad)	Xc (pu)
8	Retificador	5200.00	0.9798	0.2618	0.001704
7	Inversor	5003.42	1.0528	0.2967	0.001576

**Dados das Máquinas :**

Parâmetros	Máq. 1 & 2	Máquina 3	Máq. 4 & 8	Máquina 10
MVA	1900/1400	1944	6633	20000
Tdo' (s)	5.00	5.00	7.60	8.00
Tdo" (s)	0.053	0.06	0.09	0.09
Tqo" (s)	0.123	0.09	0.19	0.20
H (KWs/KVA)	4.50	4.50	5.07	5.00
xd (pu)	0.85	0.88	0.90	1.00
xq (pu)	0.70	0.69	0.68	0.70
xd' (pu)	0.30	0.30	0.30	0.30
xd" (pu)	0.20	0.20	0.27	0.25
xq" (pu)	0.20	0.20	0.27	0.25

Dados do Regulador Automático de Tensão:

- Modelo ST1 (IEEE) para todas as máquinas.

Ka (pu)	Ta (s)	kf (pu)	Tf (s)	Vr máx	Vr min	Vi máx	Vi min
30.00	0.050	0.0001	1000.00	5.000	-5.000	5.000	-5.000

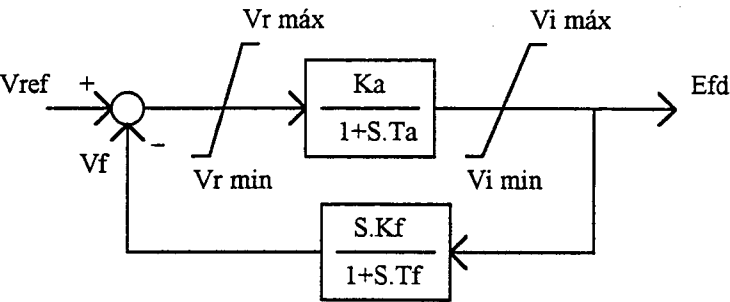


Fig. A.4- Estrutura do Reg. Automático de Tensão p/ o sistema 2.

Dados do Controle Principal no Retificador do Elo CCAT e do Sinal Adicional:

Ki (pu)	Kp (pu)	t (s)	tm (s)	K (pu)	T1 (s)	T2 (s)	Tw (s)
1.3330	0.0541	0.010	0.500	Ajust.	Ajust.	0.160	3.000

# Apêndice B

## Descrição dos Programas:

Para execução deste trabalho, cujo objetivo é o projeto coordenado de controladores em Sistemas de Potência, considerando a inclusão de elos corrente contínua, houve a necessidade de implementação de um programa para o fluxo de carga CA/CC, como também da adaptação da modelagem CCAT para os programas de cálculo de autovalores *EIGEN* e projeto de controladores *CCSP*.

Todos esses programas foram elaborados na linguagem PASCAL, que a partir de uma estruturação dinâmica permite a utilização da esparsidade para o armazenamento de dados, propiciando uma economia de memória.

A descrição dos programas, parte inicialmente da implementação de um fluxo de carga CA/CC, o *LFACDC*, responsável pela definição de um ponto de operação do sistema CA/CC. Trata-se de um Newton-Rapson Desacoplado Rápido, no qual se integra a transmissão CCAT ao algoritmo. Utiliza-se uma abordagem seqüencial, isto é, as equações CA e CC são resolvidas separadamente e assim a integração com fluxos de carga existentes

é obtida sem reestruturação ou modificação significativa na técnica de solução CA. Para as iterações CA, cada estação conversora é modelada simplesmente por injeção de potência ativa ou reativa equivalente na barra terminal. As tensões nas barras terminais obtidas a partir da iteração CA, são então utilizadas para a resolução das equações CC e conseqüentemente novas injeções de potência são obtidas. Na referência [13], têm-se maiores detalhes sobre a abordagem utilizada no desenvolvimento do programa *LFACDC*.

O programa *EIGEN*, que forma a matriz aumentada e calcula autovalores, autovetores, fatores de participação e índices de localização, foi adaptado com a estrutura CCAT, sofrendo modificações a fim de atender os propósitos do trabalho aqui desenvolvido, outras considerações a respeito do programa são encontrados no *Apêndice C* da referência [4].

Para realizar o projeto coordenado de controladores em sistemas multimáquinas, utilizou-se um outro programa, o *CCSP*, que foi desenvolvido no âmbito do LABSPOT (UFSC) durante a elaboração da dissertação de Mestrado [7], aproveitando vários procedimentos elaborados em [4]. O projeto dos controladores é baseado no método de posicionamento de pólos proposto no Capítulo IV, o programa permite originalmente o projeto de estabilizadores em sistemas de potência (ESP's) e de controladores em compensadores estáticos de reativo (CER's), ajustados coordenadamente.

A nova versão do *CCSP*, forma a matriz aumentada admitindo a inclusão de Elos de Corrente Contínua, com sinal adicional derivado da frequência da barra, do módulo de tensão na barra e da diferença de frequência entre as barras retificadora e inversora do elo. Praticamente as mesmas adaptações efetuadas no *EIGEN*, foram introduzidas no *CCSP*, pois o mesmo foi concebido de forma que possam ser incluídos outros sinais e estruturas de controle. A figura B.1 ilustra a estrutura geral do programa *EIGEN* incluindo o projeto dos controladores.

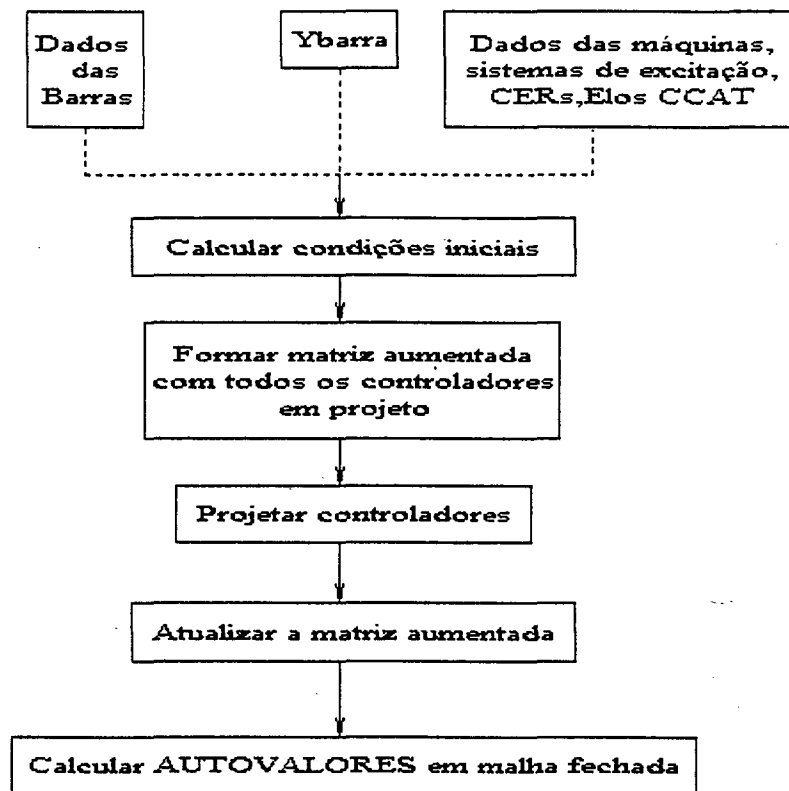


Fig. B1 - Estrutura Geral do Programa EIGEN.